

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Hornicko – geologická fakulta

INSTITUT ENVIRONMENTÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

**MOŽNOSTI VYUŽITÍ PRODUKTŮ PO SPALOVÁNÍ FOSILNÍCH
PALIV JAKO PODKLADNÍ KONSTRUKČNÍ VRSTVY POZEMNÍCH
KOMUNIKACÍ**

**UTILIZATION OF COAL COMBUSTION BYPRODUCTS FOR
CONSTRUCTION LAYER OF ROAD PAVEMENT**

Diplomová práce

Studijní obor: Zpracování a zneškodňování odpadů

Studijní program: Nerostné suroviny

Vypracoval: Bc. Stanislav Hradecký

Vedoucí práce: Ing. Hana Škrobánková, Ph.D.

Ostrava 2013

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Hornicko-geologická fakulta
Institut environmentálního inženýrství

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Stanislav Hradecký

Studijní program:

N2102 Nerostné suroviny

Studijní obor:

3904T022 Zpracování a zneškodňování odpadů

Téma:

Využití vedlejších energetických produktů pro konstrukci pozemních komunikací.
Utilization of coal combustion byproducts for construction layer of road pavement.

Zásady pro vypracování:

1. Úvod a cíl práce
2. Vedlejší energetické produkty ze spalování hnědého uhlí
 - Fyzikálně-chemické vlastnosti
 - Mineralogické složení, nedopal
 - Environmentální vlastnosti
3. Požadavky na popílky používané pro stavební účely
4. Certifikace VEP
5. Popílek používaný pro konstrukci vozovek
6. Doporučení a závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

1. MICHALÍKOVÁ, F. A KOL. Vlastnosti energetického odpadu – popola. Košice: TU Košice, 2003. ISBN 80 – 8073 – 054 – 7.
2. ČSN 72 2071. Popílek pro stavební účely – Společná ustanovení, požadavky a metody zkoušení.
3. ARORA, S., AYDILEK, A., H. Class F Fly-ash-Amended Soils as Highway Base Material. In Journal of Materials in Civil Engineering. 2005.
4. Weiglová, K. Mechanika zemin. Brno, 2007
5. M. AHMARUZZAMAN (2010): A review on the utilization of fly ash. Progress in Energy and Combustion Science, V. 36, No. 3, 327-363.

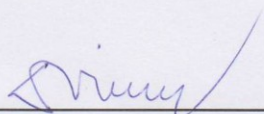
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

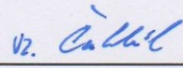
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Hana Škrobánková, Ph.D.**

Datum zadání: 31.10.2012

Datum odevzdání: 30.04.2013




prof. Ing. Vojtech Dirner, CSc.
vedoucí institutu


prof. Ing. Vladimír Slivka, CSc., dr.h.c.
děkan fakulty

Autorské prohlášení

Celou diplomovou práci včetně příloh, jsem vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

Byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).

Souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé diplomové práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.

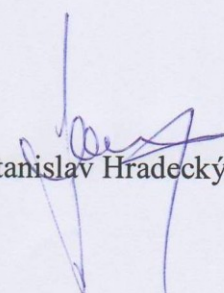
Souhlasím s tím, že diplomová práce je licencována pod Creative Commons Attribution-Non Commercial-Share Alike 3.0 Unported licencí. Pro zobrazení kopie této licence, je možno navštívit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>

Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu o komerční využití z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.

Bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu komerčnímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Mostě dne 16.4.2013

Bc. Stanislav Hradecký



Velice rád bych poděkoval paní Ing. Haně Škrobánkové Ph.D. za odborné vedení při zpracování diplomové práce. Dále pak děkuji panu Ing. Pavlu Schmidtovi z Výzkumného ústavu hnědého uhlí v Mostě za odbornou konzultaci a umožnění provedení praktické části.

Bc. Stanislav Hradecký

Anotace

Produkty po spalování fosilních paliv mají mnoho využití. Nejvíce se tyto produkty využívají ve stavebnictví. Jako certifikované výrobky mohou být používány na zásypy, ale i pro konstrukční vrstvy vozovek. U certifikovaných výrobků je nutné sledovat jejich kvalitu. Předložená diplomová práce se zabývá popisem produktů po spalování fosilních paliv a dále pak jejich využitím. V rámci teoretické části jsou popsány produkty po spalování fosilních paliv, podmínky pro využití jako konstrukční vrstvy. V rámci experimentální části byly testovány vybrané produkty po spalování s cílem ověřit jejich kvalitu pro využití v konstrukční vrstvě vozovek.

Klíčová slova: produkty po spalování, testování, certifikace, granulát

Summary

There are lots of usages for coal combustion products (CCP). The most of this usage is in civil engineering. It can be used for backfill or construction layer as certified materials. Quality of CCP's is necessary to observe. The diploma thesis is focused to description coal combustion products and their utilization. CCP's and condition for construction layer usage are described in the theoretical part. Selected CCP's was tested in the experimental part of the diploma thesis to verify quality as construction material for road construction.

Key words: coal combustion products, testing, certification, granulate

Obsah

<u>1</u>	<u>ÚVOD.....</u>	<u>1</u>
<u>2</u>	<u>CÍL PRÁCE.....</u>	<u>2</u>
<u>3</u>	<u>PRODUKTY PO SPALOVÁNÍ FOSILNÍCH PALIV</u>	<u>3</u>
3.1	POPÍLEK	6
3.1.1	POPÍLEK Z KLASICKÉHO ZPŮSOBU SPALOVÁNÍ	7
3.1.2	FLUIDNÍ POPÍLEK	8
3.2	STRUSKA.....	11
3.3	PRODUKTY ODSÍŘENÍ.....	12
3.4	GRANULÁT, STABILIZÁT.....	13
3.5	LEGISLATIVA PRO VEDLEJŠÍ ENERGETICKÉ PRODUKTY (VEP).....	14
3.6	VYUŽITÍ PRODUKTŮ PO SPALOVÁNÍ	15
<u>4</u>	<u>TECHNICKÉ PODMÍNKY PRO KONSTRUKČNÍ VRSTVY.....</u>	<u>22</u>
4.1	EKOLOGICKÁ VHODNOST.....	23
4.2	TECHNICKÉ POŽADAVKY NA ZPRACOVANÝ MATERIÁL	25
4.2.1	ZEMNÍ TĚLESO (MIMO AKTIVNÍ ZÓNU).....	25
4.2.2	AKTIVNÍ ZÓNA, ZTUŽUJÍCÍ VRSTVY NÁSYPU, PŘECHODOVÁ OBLAST	26
4.2.3	OCHRANNÉ A PODKLADNÍ VRSTVY	26
<u>5</u>	<u>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</u>	<u>28</u>
5.1	LABORATORNÍ TESTOVÁNÍ	28
5.2	METODIKY ANALÝZY.....	28
5.2.1	VLHKOST	28

5.2.2	PROCTOR STANDARD	29
5.2.3	ZRNITOST	31
5.2.4	KALIFORNSKÝ POMĚR ÚNOSNOSTI CBR	32
5.2.5	PEVNOST V PROSTÉM TLAKU	32
5.2.6	STANOVENÍ DOBY TUHNUTÍ	33
5.2.7	STATICKÁ ZATĚŽOVACÍ DESKA	34
5.2.8	ODOLNOST PROTI MRAZU A VODĚ	36
5.2.9	OBSAH STOPOVÝCH PRVKŮ	37
5.3	TESTOVANÉ MATERIÁLY	44
5.4	VÝSLEDKY TESTOVÁNÍ	44
5.5	DISKUSE	59
6	<u>ZÁVĚR</u>	<u>62</u>
7	<u>LITERATURA</u>	<u>64</u>
8	<u>SEZNAM OBRÁZKŮ</u>	<u>68</u>
9	<u>SEZNAM TABULEK</u>	<u>69</u>

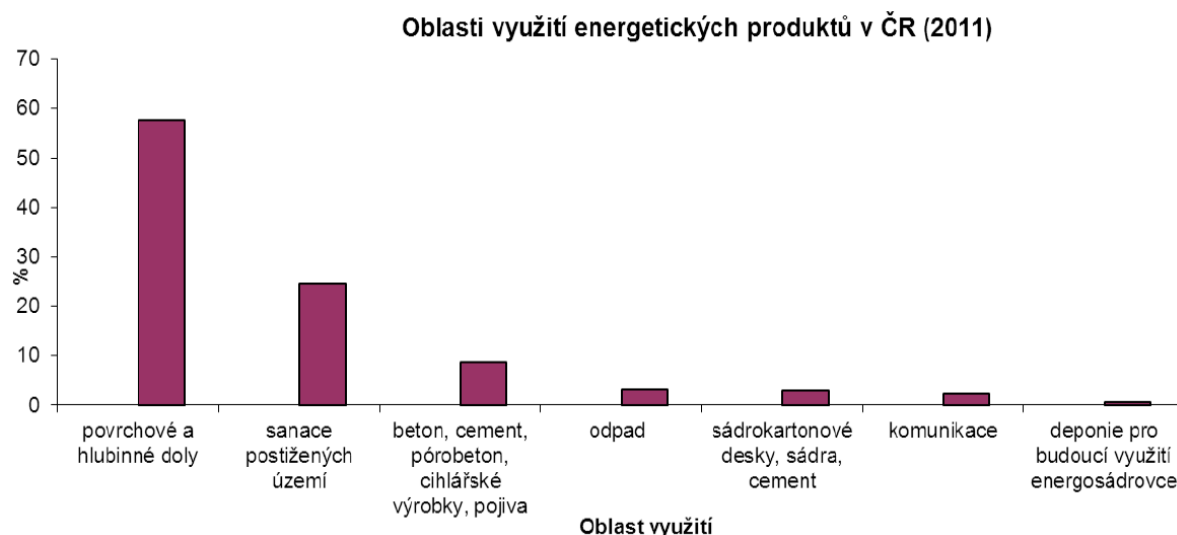
Seznam zkratek

CBR	-	kalifornský poměr únosnosti
ČSN	-	Česká státní norma
IBI	-	okamžitý poměr únosnosti
VEP	-	vedlejší energetický produkt

1 Úvod

Produkty po spalování fosilních paliv představují potenciál pro budoucí využití. S rostoucí populací je spojena i energetická náročnost, která musí být pokryta vyšší výrobou energie. I přes vzrůstající podíl energie z obnovitelných zdrojů, spalování fosilních paliv stále je nejvyužívanější způsob výroby energie.

V oblasti severních Čech jsou produkty po spalování fosilních paliv nejvíce využívány při rekultivaci a sanaci povrchových dolů. Hojně se začínají využívat stabilizáty a granuláty v dopravním stavitelství, nejen jako součást konstrukčních vrstev, ale i jako zásypy a obsypy. Stabilizát (resp. granulát) je směs popílku a další produktů po spalování fosilních paliv s vodou. V míchacím centru se přesně dávkuje množství jednotlivých komponent za účelem vzniku optimálně zavlhlého popílku, resp. granulátu. Obrázek 1 ukazuje oblasti využití energetických produktů v ČR v roce 2011. Je patrné, že nejvíce se spotřebuje vedlejších energetických produktů (VEP) v hornickém průmyslu – při zakládání zemin na výsypkách, likvidaci hlubinných děl zasypáním, sanaci vytěžených území. Využití v dopravním stavitelství je omezeno dostupností vhodného materiálu.



Obrázek 1. Oblasti využití energetických produktů v ČR [1]

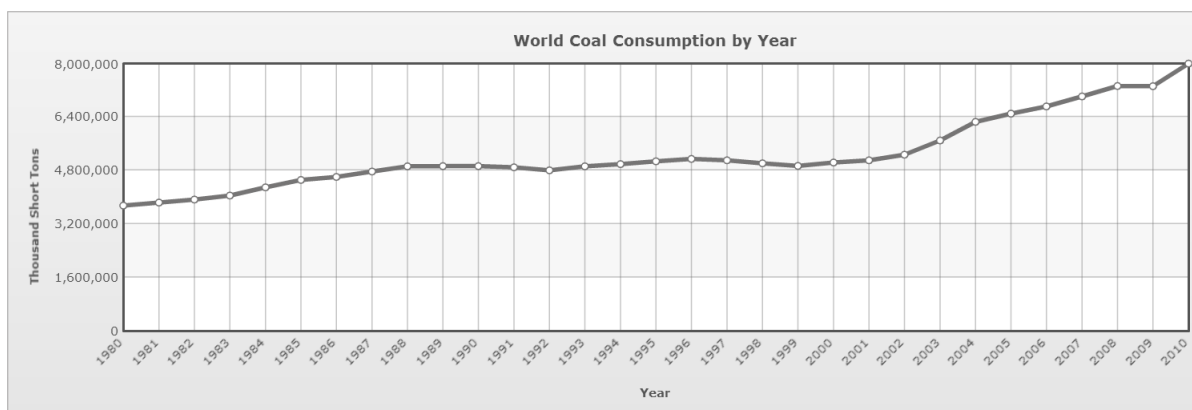
2 Cíl práce

Cílem diplomové práce je popsat a otestovat produkty po spalování fosilních paliv a ověřit jejich využití v dopravním stavitelství, konkrétně v konstrukčních vrstvách komunikací.

3 Produkty po spalování fosilních paliv

V roce 2011 byla světová produkce uhlí 7 678 milionů tun, to představuje 30,3 % celosvětových primárních energetických potřeb a zároveň z tohoto množství se vyrobí 42% světové elektřiny. Oproti roku 2010 je to nárůst o 6,6 %. Mezi největší producenty uhlí patří Čína, která pokrývá až jednu třetinu celkové produkce, dále následují USA, Indie, Austrálie. U hnědého uhlí byl zaznamenán nárůst těžby v porovnání s předchozími roky. V roce 2011 bylo vytěženo 1041 mil. tun hnědého uhlí. Největší producenti hnědého uhlí jsou Německo, Polsko a Turecko. Česká republika je v top ten producentů hnědého uhlí, kdy v roce 2011 bylo vytěženo 43 mil. tun (v Německu to bylo 176 mil. tun) [2].

Uhlí je nejčastěji používaný tuhý materiál pro výrobu tepla a elektřiny. Světová spotřeba uhlí v roce 2007 byla 7 192 milionů tun, z toho 75% je využíváno pro výrobu elektřiny. Čína jako největší spotřebitel spotřebovala 2 893 milionů tun (asi 40% světové spotřeby) [3]. Na obrázku 2 je znázorněn vývoj spotřeby uhlí ve světě, je patrné, že od roku 2002 je nárůst strmější.



Obrázek 2. Světová spotřeba uhlí [4]

Jak již bylo řečeno, uhlí je nejvíce spotřebováno na výrobu energie. V následující tabulce je uveden přehled zemí, které jsou závislé na uhlí pro výrobu elektrické energie.

Tabulka 1. Závislost zemí na energetickém uhlí [2]

Jižní Afrika	93%	Kazachstán	70%	Maroko	55%
Polsko	90%	Indie	69%	Řecko	55%
Čína	79%	Izrael	63%	USA	45%
Austrálie	76%	Česká republika	56%	Německo	44%

Uhlí je hornina, která je složená z uhlíku, vodíku, kyslíku, síry a radioaktivní příměsi (nejčastěji uran). V přírodě se nachází pod povrchem země a dá se získat dvěma způsoby, povrchovou těžbou (hnědé) nebo hlubinnou těžbou (černé). Využití této horniny je převážně v energetice, kde se používá jako palivo do tepelných elektráren, nebo v domácnostech na vytápění nebo na ohřev vody. Uhlí dělíme na:

- Lignit - je nejmladší hnědé uhlí. Má menší výhřevnost, než hnědé uhlí a při těžbě hnědého uhlí se nachází nad ním, protože je mladší. Využívá se většinou k vytápění domů anebo v chemickém průmyslu.
- Hnědé uhlí - je usazená hořlavá hornina hnědé barvy, která se využívá jako palivo pro tepelné elektrárny nebo pro domácnosti. Hnědé uhlí je mladší a obsahuje méně uhlíku než černé uhlí a je méně výhřevnější.
- Černé uhlí - je usazená hořlavá hornina černé barvy, která se používá jako palivo v tepelných elektrárnách, na výrobu tepla a energie. Patří mezi fosilní paliva (neobnovitelný zdroj energie) a vzniklo v prvohorách a druhohorách. Uhlí se nachází ve vrchní zemské kůře a těží se v hlubinných dolech. Černé uhlí obsahuje 75% až 93 % uhlíku. Celosvětové zásoby uhlí nám vydrží zhruba 200-300 let.
- Antracit - je nejvýhřevnější druh černého uhlí. Má nejnižší obsah hořlavých látek a nejvyšší obsah uhlíku ze všech druhů uhlí. Antracit je metamorfované černé uhlí, které před několika miliony bylo vystavováno vysokým teplotám a tlakům. Díky těmto procesům získalo lepší vlastnosti, než černé uhlí [36].

Chemická energie vázaná v palivu, je běžným procesem spalování přeměňována nejprve na energii tepelnou. Ta se poté dále převádí nejprve na mechanickou energii resp. kinetickou energii, teplotním médiem zde bývá nejčastěji běžná vodní pára vyráběná v parogenerátoru. Pára je přiváděna do turbíny, což je zařízení mechanicky spojené s elektrickým generátorem respektive s alternátorem. Kinetická energie je z parní turbíny vyváděna do alternátoru společným hřídelem, mechanická kinetická energie z hřídele stroje se tak dále převádí pomocí alternátoru na elektrickou energii, která je ze stroje vyváděna do elektrorozvodné sítě [5].

Produkty, které vznikají, jako vedlejší energetický produkt (VEP) při spalování v klasických elektrárnách, nacházejí uplatnění v různých oblastech využití. Mimo obrovského finančního přínosu jako alternativy jiného produktu je tu i nepřehlédnutelný ekologický přínos. Nedochází tak ke skládce materiálu, který je možné využívat a zároveň nevzniká žádná ekologická zátěž [6].

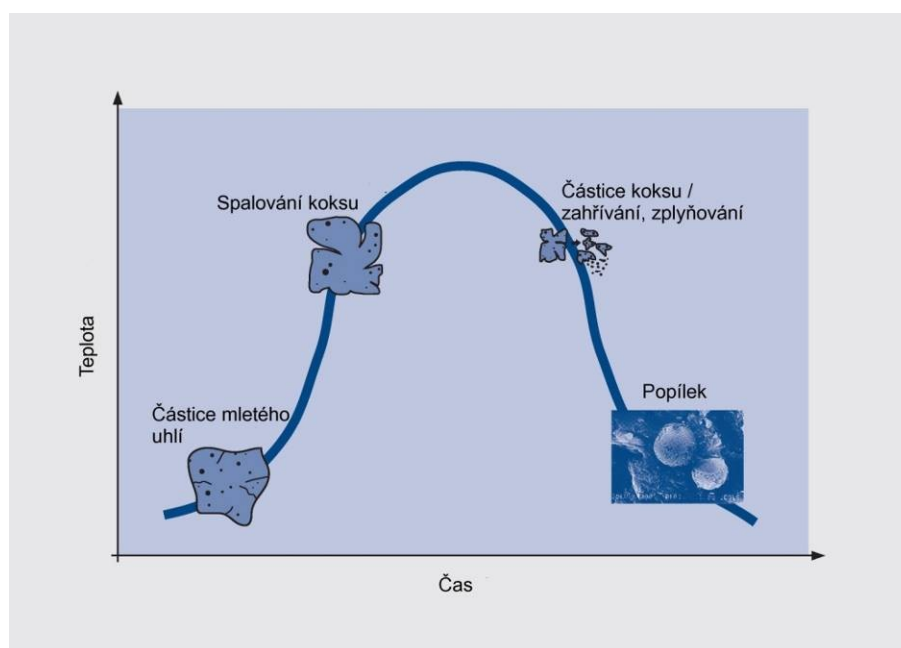
Druhy spalovacích procesů:

- klasické práškové topeniště - produkce strusky a popílku
- roštové topeniště - produkce škváry a popílku
- fluidní topeniště - produkce popela a popílků z odsíření spalin tzv. aktivních popelů se zbytkovým obsahem CaO [37]

V procesu odsířování a odpopelňování kotle přes míchání a vlhčení směsi tuhých zbytků spalování a odsíření, transport a uložení směsi a její případné následné tvrdnutí se výrazně mění podstata materiálu. V zásadě je nutno rozlišovat tři stavy a jim odpovídající fyzikálně odlišné hmoty. Tzv. primární produkty, kdy při mokré vápencové vypírce vzniká škvára, popel a energosádovec (kašovitý nebo velké hroudy). Při polosuché adsorpci škvára, popel a produkt odsíření (suchý práškový). V případě fluidního spalování filtrový popel, ložový popel a v menší míře popel z cyklónů. Dále tzv. čerstvé směsi, které vznikají smícháním výše uvedených produktů a jejich zvlhčením vodou a tzv. stabilizát jako směs popílku, vápna a vody. V menší míře v nich může být i struska a energosádovec. Granuláty mají stejné složení jako stabilizáty. Deponátem rozumíme netvrdnoucí hmotu, která se zpevňuje pouze odvodněním, vysycháním nebo tixotropií [22].

3.1 Popílek

Popílek vzniká při spalování práškového uhlí při provozu elektráren a tepláren. Popílek je zachycován z kouřového plynu v usazovacích komorách, v mechanických nebo elektrostatických odlučovačích. Při vlastním spalování jsou všechny mineralogické složky vystaveny různě dlouhou dobu vysokým teplotám a navíc ještě mohou procházet oxidačním nebo redukčním prostředím. Popílky obsahují vždy ještě zbytky původního nebo do různého stupně přeměněného paliva [7]. Obrázek 3 ukazuje vznik popílku.



Obrázek 3. Schéma vzniku popílku [12]

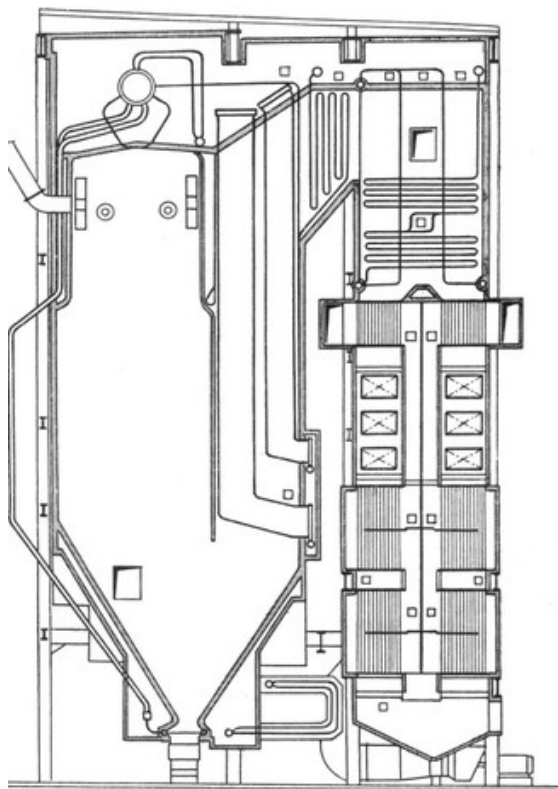
Základní rozdělení popílků podle ASTM vychází z jeho chemického složení nebo obsahu CaO. Takto se popílky dělí na:

- Popílky, které obsahují vysoký podíl oxidu vápenatého CaO (15 až 40 % hmotnosti), oxidu železitého Fe_2O_3 , oxidu hlinitého Al_2O_3 , oxidu křemičitého SiO_2 , a které vznikají ze spalování uhlí nižší kvality (podle americké klasifikace ASTM C 618 patří takový popílek do třídy C).
- Popílky, jejichž obsah oxidu vápenatého je zanedbatelný (méně než 5 %) a typicky je přítomen vysoký podíl oxidu křemičitého SiO_2 , a který vzniká spalováním antracitu nebo lignitu (podle americké klasifikace ASTM C 618 patří takový popílek do třídy F) [21].

3.1.1 Popílek z klasického způsobu spalování

Metoda klasického spalování - teplota spalování je 1200 – 1700 °C. Vzniká oxid uhličitý a oxid siřičitý. Ten je toxický a je zachycován v odsiřovacím zařízení. Nejpoužívanější jsou tzv. granulační kotle (obrázek 4). Popílký získané touto metodou obsahují zpravidla více než 50 % sklovité fáze [7].

Práškové kotle spalují uhelný prášek, rozemletý na velikost zrn pod 1 mm, v hořácích. Rozemletím kusového uhlí na prášek dochází ke zvětšení měrného povrchu paliva 100 násobně, a tím dochází i k intenzivnějšímu spalování. Práškové kotle také nemají rošt, který omezuje teplotu primárního vzduchu a zatížení ohniště. Proto jsou používány pro nejvyšší výkony. Prakticky největší kotel u nás má parní výkonnost 1678 t_{páry}·h⁻¹ (elektrárna Ledvice), ve světě pak 4200 t·h⁻¹. Práškové kotle se stavějí od cca 50 t·h⁻¹. Uhlí se na prášek mele v mlecích okruzích (používají se ventilátorové, tlukadlové, trubnaté a kladkové mlýny). V mlýnicích také dochází k vysušení paliva. Rozemletý prášek se ze zásobníku do ohniště přivádí pneumaticky nosným médiem, které nazýváme primární směs. Nosným médiem může být vzduch, spaliny nebo jejich směs. Směs nosného media a uhelného prášku (tzv. primární směs) a sekundární vzduch vstupuje do kotle práškovými hořáky. V prostoru ohniště se směs mísí s další částí vzduchu – terciárním vzduchem. Doba spalování u práškových kotlů je 0,5–3 s, zatímco při spalování na roštu bývá v desítkách minut. Spalovací vzduch se přehřívá na 300–450 °C. Mezi nevýhody práškových ohnišť patří zvýšení investičních nákladů na mlecí okruhy a snížení účinnosti celého zařízení díky vyšší vlastní spotřebě. Dalším dopadem používání práškových (zejména granulačních) ohnišť je vysoké znečištění spalin popílkem, které klade vyšší požadavky na následná odprašovací zařízení. Rozeznáváme dva typy práškových kotlů:



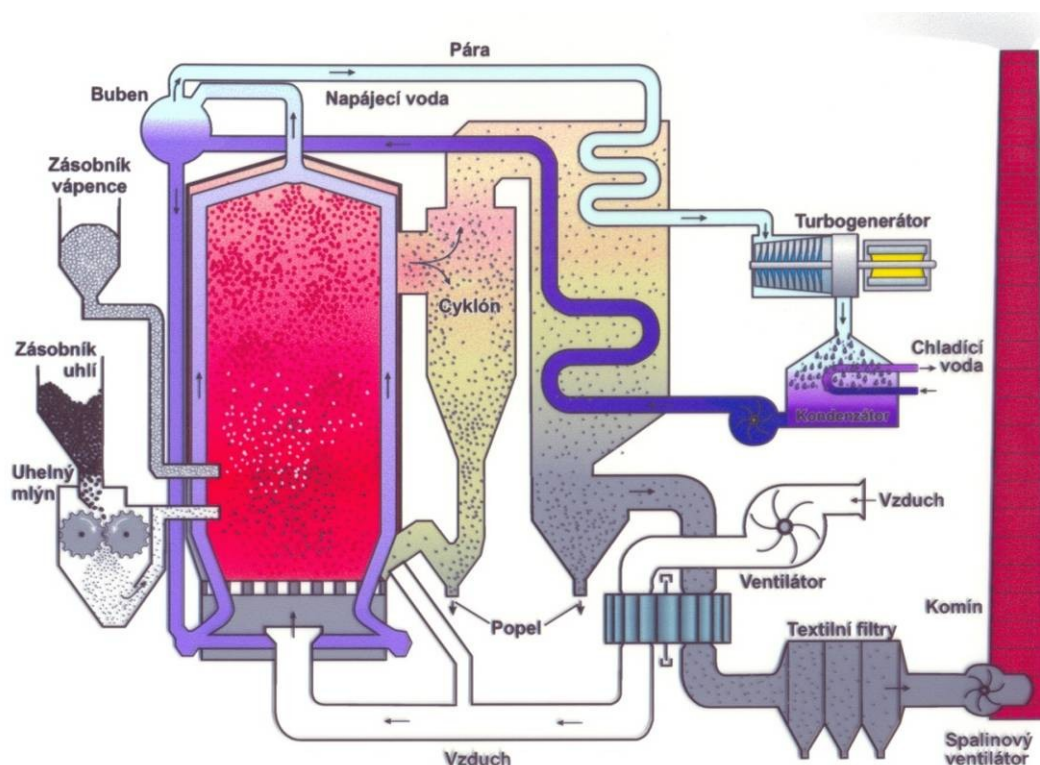
Obrázek 4. Granulační kotel [8]

- granulační se suchým odvodem tuhých zbytků z ohniště v podobě škváry,
- výtavné s tekutým odvodem tuhých zbytků z ohniště v podobě tekuté strusky tj. nad bodem tečení popele.

V našich práškových kotlích se téměř výhradně používá granulačních ohniště, která jsou více vhodná pro spalování našich hnědých uhlí. Granulační ohniště je vhodné pro spalování méněhodnotných paliv. Spalování zde probíhá při relativně nízkých teplotách tak, aby nedošlo k překročení teploty tečení popele, což vyžaduje intenzivní chlazení spalovací komory. Částice popele jsou během spalování natavené, shlukují se a tvoří škváru. Škvára padá do spodní části ohniště, do výsypky, ze které je kontinuálně odváděna. Stupeň zachycení popele ve škváře je 8–20 % z celkového množství popeloviny obsažené v palivu. Zbytek odchází se spaliny, prochází všemi teplosměnnými plochami a je nutno jej zachytávat v odprašovacích zařízeních [8].

3.1.2 Fluidní popílek

Metoda fluidního spalování - jedná se o jeden z moderních způsobů spalování uhlí a dalších druhů paliva. Spolu s odsířením je nejúčinnější metodou snižování emisí škodlivých látek do ovzduší. Na rozdíl od běžného odsířování, které čistí spaliny až za spalovacím procesem, umožňuje likvidaci škodlivin přímo v kotli. Vlastní spalování probíhá tak, že se drobně drcené palivo a vápenec přivádí do kotle s regulovaným množstvím vzduchu. Uhlí je spalováno speciálním způsobem, ve vlnosu, což umožňuje dokonalé vyhoření paliva. Kvalitu spalování ještě zvyšuje přítomnost inertu (např. písek). Vápenec, který je přidáván do fluidního lože k palivu, reaguje s oxidem siřičitým, který vzniká oxidací síry obsažené v uhlí a uvolňované v průběhu hoření. Reakcí vápence a SO_2 vzniká tuhý produkt, který je součástí popela. Spaliny jsou tak zbaveny až 97 % SO_2 . Ve fluidním kotli je teplota spalování poměrně nízká, cca 800 – 850 °C [7]. Na obrázku 5 je znázorněn fluidní kotel spalující fosilní paliva.



Obrázek 5. Fluidní kotel [11]

Kotle pracující na principu spalování paliva ve fluidní vrstvě byly vyvinuty pro spalování paliva širokého rozsahu. Fluidizace je obecně děj, v němž je soubor pevných látek udržován ve vznosu proudem tekutiny. Fluidní vrstva tvoří disperzní systém, který se vytváří průtokem plynu vrstvou částic nasýpaných pod pórovité dno – tzv. fluidní rošt. Náplň fluidní vrstvy tvoří palivo, odsiřovací aditivum (většinou vápenec) a aditivum pro stabilitu fluidní vrstvy (inertní materiál – např. písek). Výhody fluidního spalování:

- Možnost dávkování vápence do kotle za účelem částečného odsíření spalin, účinnost odsíření je od 40 do 95 % podle typu kotle, kvality promísení paliva s aditivem a množství dávkovaného vápence, fluidní kotle tedy nevyžadují budování odsiřovacího zařízení za kotlem.
- Nízké teploty ve fluidní vrstvě a odstupňovaný přívod vzduchu do ohniště mají příznivý dopad na redukci NO_x ve spalinách.
- Ve fluidních kotlích lze spalovat i méněhodnotná paliva a odpady s velmi nízkou výhřevností, v jiných typech kotlů nespalitelné.

- Spalování probíhá s vyšším zatížením roštové plochy oproti klasickým roštovým kotlům a rozměry roštu proto vycházejí nižší.
- Mají nižší komínovou ztrátu, neboť odsířené spaliny na konci kotle mohou mít v důsledku nižšího rosného bodu nižší teplotu. Účinnost kotlů bývá při jmenovitých parametrech 92–94 %.

Nevýhodou fluidního spalování je zvýšená citlivost na granulometrii paliva[8].

Směsným reakčním produktem fluidní technologie spalování je fluidní popel a popílek jako tzv. tuhé zbytky fluidního spalování, tedy směs popela z paliva, síranu vápenatého v podobě anhydritu a oxidu vápenatého (volného vápna), popř. uhličitanu vápenatého z přebytkového vápence. Rozdíly mezi popílkem z klasického a fluidního spalování jsou rozdíly nejen v chemickém, ale i v mineralogickém složení. Zásadní rozdíly jsou především ve vyšším podílu oxidu sirového SO_3 v hodnotách až 20 % hm., volného vysoce reaktivního CaO až 15 % hm. A překvapivě někdy i vyšší ztráty žiháním až 15 hm. % u typu popílku z fluidního spalování. Zatímco tradiční vysokoteplotní elektrárenský popílek vykazuje zpravidla pouze pucolánovou aktivitu, fluidní a teplárenské popílků a popely tuhnou a tvrdnou nedefinovatelně již při pouhém smísení s vodou bez jakýchkoli dalších příměsí a přísad. Na pojivých vlastnostech fluidního popela a popílku se podílí zejména přítomný anhydrit (až 20 hm. %) a volné vápno, které je při dané teplotě měkce pálené a tudíž, jak již bylo uvedeno, je velmi reaktivní [7]. V tabulce 2 je uvedeno chemické složení popílku, resp. srovnání klasického popílku (tj. z klasického způsobu spalování) a fluidního.

Tabulka 2. Rozdíl v chemickém složení popílku [9]

<i>popílek</i>	<i>Zastoupení složek</i>										
	SiO_2	Al_2O_3	CaO	CaO*	MgO	TiO_2	Fe_2O_3	SO_3	Na_2O	K_2O	ZŽ
klasický	52,22	28,01	3,09	--	1,38	2,37	9,66	0,60	0,51	1,59	5,9
fluidní	42,34	19,44	18,21	2,58	2,49	1,55	5,79	5,26	0,37	1,41	10,7

*Volné CaO

ZŽ – ztráta žiháním

Fluidní popílků jsou charakteristické vyšším obsahem Ca, který je přidáván do spalovacího procesu nejčastěji ve formě vápence kvůli odsíření. Krystalickou fází tvoří následující minerály: anhydrit CaSO_4 , portlandit Ca(OH)_2 , sádrovec $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, kalcit

CaCO_3 , křemen SiO_2 , hematit Fe_2O_3 , magnetit Fe_3O_4 , bazanit $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$, ettringit $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$, hanebachit $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$, traumazit $\text{Ca}_6\text{Si}_2(\text{SO}_4)_2(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_{12} \cdot 24\text{H}_2\text{O}$, tobermorit $\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ [10].

3.2 Struska

Struska je vedlejším produktem spalování uhlí v granulačních kotlích. Struska se odlučuje ve výsypce spalovací komory kotle, kde dopadá do vodní lázně a po odvodnění je expedována odběratelům. Struska odpovídá svým zrnitostním složením a mechanickými vlastnostmi slabě zahliněným, špatně zrněným pískům. Struska je dobře zpracovatelná vibračními hutnicími prostředky. Pevnost CBR splňuje požadavky Technických podmínek „Návrh a provádění staveb pozemních komunikací s využitím popílků a popelů“ TP 93, vydaných MDS 3. 4. 2003 a ostatních technických předpisů. Strusku lze proto využívat do násypů zemních těles pozemních komunikací, zásypů rýh a kanalizačního potrubí, obsypů mostních opěr apod. Nízká objemová hmotnost strusky je velmi výhodná zejména při stavbách násypových těles na málo únosném podloží. Výhodně lze strusku využít vzhledem k její vysoké smykové pevnosti i pro zásypy opěrných konstrukcí [13].

Z obrázku 6 je patrné, jakou zrnitost mohou mít strusky. Jedná se vesměs o materiály s různou zrnitostí, od drobných štěrků (2 – 8 mm) až po jemné písky (0,063 – 0,2 mm). Výskyt drobnějších částí je většinou do 10 %.



Obrázek 6. Struska [15]

Chemické složení strusky je závislé na typu a složení uhlí, není závislé na spalovacím zařízení. Struska je vesměs tvořena primárně SiO_2 , Fe_2O_3 a Al_2O_3 s malým množstvím CaO , K_2O , Na_2O , MgO , TiO_2 , P_2O_5 a SO_3 . Síra se vyskytuje ve strusce velice omezeně (ve formě

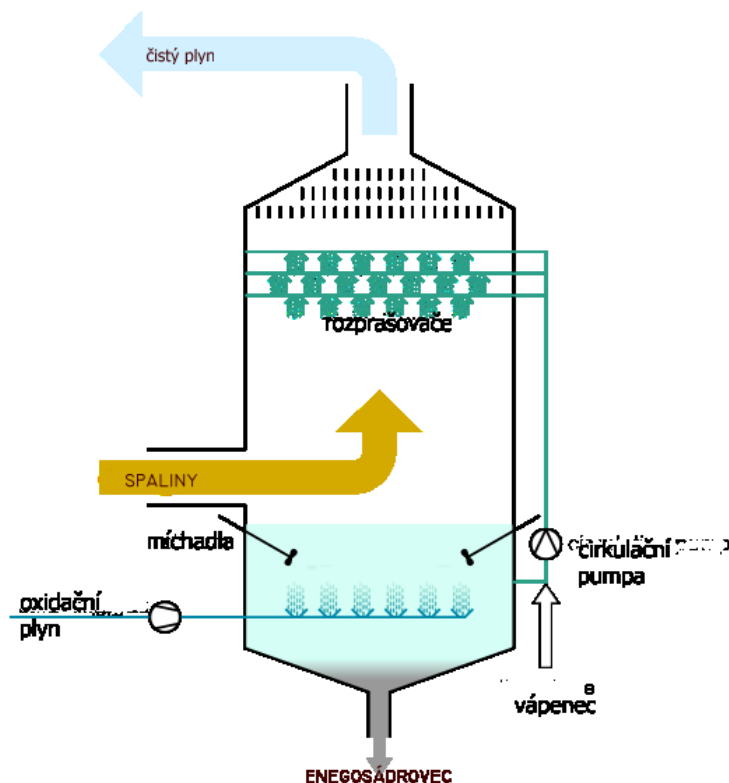
pyritu), v množství do 1 %. Díky nízkému pH a obsahu solí, mohou být strusky korozivní. Optimální vlhkost strusky je 8 – 20 %, maximální suchá objemová hmotnost je v rozmezí 1300 – 1650 kg/m³ [16].

3.3 Produkty odsíření

Energosádrovec vzniká v odsiřovacím absorbéru jako produkt reakce mezi vápencem (zřídka jiným absorbentem) a kyselými složkami kouřových plynů (především SO₂, ale i HCl a HF) a následné oxidace vzniklého siřičitanu vápenatého. Složení je následující: 80-95 % CaSO₄ · 2H₂O (minerál sádrovec), 1 – 10 % SiO₂, 0,5-5 % Al₂O₃, 0,5 – 3 % CaCO₃ + MgCO₃ a dále pod 1 % Fe₂O₃, MgO, Na₂O, K₂O, SO₂, F, Cl. Střední velikost částic bývá 70 - 90 mm v závislosti na konkrétní technologii odsíření. Hustota sádrovce je 2320 kg/m³, sypaná hmotnost závisí na vlhkosti a pohybuje se v rozmezí 850 -1200 kg/m³, sypaná hmotnost setřeseného materiálu může dosahovat až 1500 kg/m³. Sádrovec je produkován zpravidla jako suspenze nebo vlhká hmota s vlhkostí kolem 10 %. V tomto stavu je sádrovec velmi lepkavý a při manipulaci a dopravě se přilepuje na vše, s čím přijde do styku. Je-li užit pro výrobu sádry, suší se. Pro zabránění prášení při transportu se někdy briketuje, to znamená, že se práškový sádrovec stlačí mezi dvěma válci s prohlubněmi. Podobným způsobem se vyrábějí tablety nebo známé palivové brikety z uhelného prachu nebo dřevěných pilin. Obsah kovů v energosádrovci je obvykle desetkrát až stokrát nižší než v popílku. Produkt odsíření polosuchou metodou vzniká reakcí mezi vápnem a kyselými složkami kouřových plynů. Na rozdíl od energosádrovce však obsahuje převážnou část síry ve formě půlhydrátu siřičitanu vápenatého CaSO₃ · 1/2H₂O, který se v procesu odsíření na síran již dále neoxiduje. Díky většímu přebytku vápna pro odsíření obsahuje i produkt větší množství volného vápna. Vlhkost se pohybuje od 1 do 7%. **Produkt fluidního spalování s odsířením** je vlastně směsí popele, produktů odsíření, nerozloženého vápence a nezreagovaného vápna, které vzniká rozkladem nadbytečného vápence v ohništi. Složení závisí na kvalitě uhlí, vápence, technologických podmínkách spalování a množství dalších vlivů. Příklad složení může být následující: 38% SiO₂, 19% Al₂O₃, 5% Fe₂O₃, 2% TiO₂, 26% CaO, 1% MgO, 6% SO₃, 0,01% Cl, 0,1% F, přičemž část CaO je ve formě síranu vápenatého, část ve formě volného vápna a menší část jako nerozložený CaCO₃. Produkt fluidního spalování může obsahovat až 15% nedopalu. Zrnitost (velikost zrn materiálu), fyzikální vlastnosti a obsahy kovů se příliš neliší od popílku. **Produkt suché aditivní metody odsíření** se složením podobá předchozímu

materiálu, rozdíl spočívá především v reaktivitě volného vápna (CaO) a vlastnostech obsaženého popílku [14].

Na následujícím obrázku je znázorněno odsiřování v absorbéru.



Obrázek 7. Schéma odsiřování kouřových spalin [17]

3.4 Granulát, stabilizát

Granulát, je finálním produktem procesu smíchání popílku, produktu z odsíření res-, energosádrovce a vody v míchacím zařízení. Je to homogenizovaná směs těchto prvků v definovaném hmotnostním poměru – poměry směsí lze kombinovat dle potřeb odběratele. Granulát, jež má konzistenci sypké směsi, je dodáván ve vlhkém stavu přímo ze zásobníku. Má vhodné geotechnické i environmentální vlastnosti pro použití na úpravu krajiny. Je určen pro násypy a zásypy, může být využit pro stavbu pozemních komunikací a dále pak pro různé asanace a rekultivace [39].

Stabilizát je v elektrárnách běžně používaný pojem pro produkty vyráběné z popílkových směsí. Je to směs popelovin s odpadními vodami a příměsí 0,5 až 3,5 % vápna. Aditivovaný granulát je v podstatě stejný produkt jako stabilizát s obsahem 0,5 % vápna. Je

však určen na zakládání do vyuhlených uhelných lomů. Uvedené stavební hmoty mají certifikáty a jsou vyráběny v různých modifikacích [40].

3.5 Legislativa pro vedlejší energetické produkty (VEP)

Česká legislativa umožňuje upravit VEP tak, aby ho producent mohl prodávat jako výrobek případně využít jiným způsobem. Výrobky poté můžeme dělit na stanovené a nestanovené. Stanovený výrobek je dán zákonem č. 22/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky, nařízením vlády č. 163/2002 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na vybrané stavební výrobky, ve znění nařízení vlády č. 312/2005 Sb. a nařízení vlády č. 190/2002 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na stavební výrobky označované CE, ve znění pozdějších předpisů. Nestanovený výrobek se řídí vyhláškou MŽP č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu. V prováděcím předpisu zákona 22/1997 Sb., kterým je NV 163/2002 Sb., v platném znění, jsou výrobky rozděleny do 12 skupin dle jejich určeného použití ve stavbách a ke každé výrobkové skupině jsou stanoveny postupy posuzování shody. Podle přílohy č. 2 tohoto nařízení vlády je možné popílký a směsi s popílkem certifikovat jako materiály pro konstrukční vrstvy vozovek a pro násypy a zásypy při stavbě pozemních komunikací. V případě VEP, provádí posouzení shody téměř vždy autorizovaná osoba (AO), která vydává certifikát - platnost certifikátu je podmíněna prováděním pravidelného ročního dohledu AO nad řádným fungováním systému řízení výroby, výrobce následně vypracovává prohlášení o shodě, které obsahuje náležitosti uvedené v § 13 NV č. 163/2002 Sb. Certifikované VEP nespadají pod působnost zákona č. 185/2001 Sb., o odpadech a změně některých dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů. Orgánem dozoru je Česká obchodní inspekce (ČOI), nebo v rozsahu stanoveném zvláštními právními předpisy Český báňský úřad. ČOI může provádět rozbory nebo zajistit provedení rozborů k ověření toho, zda výrobky plní požadavky vyplývající ze zákona č. 22/1997 Sb. Platnost STO (stavebně technické osvědčení) je §3, odst. 3 NV č. 163/2002 Sb., omezena na dobu 5 let. Pokud nedojde ke změně podstatných skutečností, za kterých bylo STO vydáno, může AO platnost prodloužit. Platnost certifikátu je podmíněna platností STO a prováděním pravidelného ročního dohledu AO nad řádným fungováním systému řízení výroby [38].

3.6 Využití produktů po spalování

Popílky, popely a škváry se podle svých vlastností využívají při výrobě betonu a betonových výrobků, v cihlářské výrobě, zálivkových a jiných speciálních směsí a tmelu, suchých omítkových směsí, cementu, umělého kameniva, konstrukční vrstvy silnic, asfaltových hydroizolačních pásů, jako výplně pro masivní stavby (hráze přehrad, protipovodňové valy), pro stavební násypy [18].

K nejčastěji ve stavebnictví využívaným průmyslovým odpadním materiálům patří popílek vznikající spalováním uhlí. Jeho využití je bohaté ve stavebních hmotách, ale především k výrobě umělého kameniva (agloporit). Oba typy popílků (z vysokoteplotního i fluidního spalování) jsou pro výrobu využitelné z hlediska množství i z hlediska vhodných vlastností ve výrobě betonu i pórobetonu, v cihlářské výrobě, při výrobě cementu, betonu, ve výrobě suchých směsí a tmelů, umělého kameniva, jako zasypy, stabilizace zemin a jako výplňový materiál [19].

Jedním z vedlejších certifikovaných výrobků Elektráren Pruněv je tzv. stabilizát, který se používá jako zasykový materiál pro vyplňování vytěžených důlních prostor a tvarové úpravy reliéfu krajiny při rekultivacích. Vedlejší energetické produkty vznikající v Elektrárnách Tušimice jsou certifikované výrobky, které lze využít ke stavebním účelům (popílek, struska a deponát). Deponát je dopravován do vytěžených prostor k revitalizaci krajiny po důlní činnosti, certifikovaná struska bude využívána i k asanaci bývalého složiště Tušimice a samotný certifikovaný popílek je nabízen ke komerčnímu využití. V případě provozu úložiště Vysočany projevila obec Hrušovany zájem na jiném způsobu rekultivace, konkrétně na vybudování golfového hřiště.

Vedlejší energetické produkty vznikající v Elektrárně Mělník slouží především při výrobě sádkokartonových desek (energósádovec) a dále jako surovina při výrobě stavebních hmot (popílek) a jako podkladový materiál pro stavbu silnic a zpevněných ploch (aglomerát). Použití těchto výrobků ve stavebnictví snižuje náklady na výstavbu v sektoru stavebnictví. Mezi výrobky Elektrárny Mělník počítáme energósádovec, popílek, aglomerát a v blízké budoucnosti i strusku. Elektrárna Tisová je v současné době držitelem tří platných certifikátů: na stabilizát z fluidního popela k vyplňování vytěžených povrchových důlních prostor, na stabilizát z popela a energósádovce a na stabilizát z fluidního popela k užití pro zemní konstrukce a podkladové vrstvy staveb pozemních komunikací.

V Elektrárně Počerady se z energosádrovce produkuje briketovaný sádrovec, který se prodává do cementáren pro výrobu cementu, a sypaný sádrovec, který je možné použít také pro výrobu cementu a navíc se zkouší jeho využití při výrobě průmyslových hnojiv. Dalším produktem je sádra, ze které se vyrábějí ve společném podniku s firmou KNAUF sádrokartonové desky. Dále se sádra ve velké míře přidává do omítkových směsí. Popílek je základní surovinou pro výrobu stabilizátu a granulátu, který se využívá k rekultivaci odkaliště a dále se odváží do Mostecké uhelné, a. s., která ho využívá jako výplňkový materiál do vyuhlených šachet. Popílek v menší míře slouží i jako přísada při výrobě betonových směsí.

V Elektrárně Hodonín se vyrábí tři druhy vedlejších energetických produktů, z toho dva certifikované. První certifikovaným produktem je suchý ložový popel, který pod názvem RESAN EHO částečně nahrazuje písek a zeminu a dá se využít pro zásypy výkopů, obsypy inženýrských sítí, podkladové vrstvy komunikací, výrobu betonových směsí a jako přídavek rekultivačního substrátu. Druhým certifikovaným produktem je stabilizát REHAS EHO a REHAS II EHO. Jde o popelovou maltu (zvlhčená popelová směs), kterou lze využít pro výstavbu hrázových těles, vyrovnávání terénních nerovností před rekultivací skládek, jako podložní materiál silnic, umělé kamenivo, přídavná směs pro výrobu cihel a podkladový materiál pod základy při stavbě domů. Dosud necertifikovaným – i když zcela bezpečným – produktem je úletový popílek; ten je možné využít pro výrobu betonových směsí, cemento-popílkové suspenze a jako přídavek do surovin k výrobě hurd.

Vedlejší energetické produkty vznikající v Elektrárně Chvaletice jsou využívány ve stavebnictví jako materiál pro základy staveb, silnic a železnic, pro úpravy krajiny, terénů a stavby protizáplavových valů. Využíváním těchto certifikovaných produktů dochází k nezanedbatelným úsporám přírodních surovin, hlavně pro stavebnictví (kamenivo, cihlářská hlína, přírodní sádrovec, písky). Stabilizát je ukládán na složiště, kde je rozhrnován a hutněn. Nepropustnost a nízká vyluhovatelnost stabilizátu umožňuje jeho ekologické ukládání v rámci vlastního projektu „Krajinotvorba“, který vrací krajinu, zdevastovanou těžbou pyritu v Mangano-kyzových závodech ve Chvaleticích, do původní podoby. Elektrárna Chvaletice se stala z tohoto hlediska „bezodpadovou elektrárnou“, neboť všechny certifikované suroviny jsou obchodně využívány. V rámci rekultivace manganokyzového dolu se uskutečňuje výsadba na pokusných plochách a ve spolupráci s Výzkumným ústavem meliorací a ochrany půd Praha probíhají pokusy s homogenizací substrátů.

V Elektrárně Ledvice se odpady z procesu spalování a odsíření také přepracovávají na druhotnou surovinu – stabilizát – využitelnou zejména ve stavebnictví. Kromě jiného slouží i pro rekultivaci vytěženého lomu Fučík. Jedním z příkladů užití přepracovaných odpadů z Elektráren Poříčí je struskopopílkové odkaliště Debrné. Tam, kde dříve existovalo pouze odkaliště s černou směsí vody a popílku, je dnes dopravován popílek z fluidních kotlů potrubím ve formě zahuštěné směsi, která ve styku s ovzduším homogenizuje a tuhne v nepropustný stabilizát. Certifikovaný stabilizát se zde používá pro tvarové úpravy krajiny.

Elektrárna Dětmarovice vyprodukuje ročně cca 250 000 tun vedlejších energetických produktů. Z tohoto množství je 80 % jemného popele, který je certifikován a ze 70 % využíván ve stavebnictví jako přísada do cementu nebo betonu. Zbytek je ukládán na úložiště jako odpad. Struska, již je z celkové produkce popelovin okolo 10 %, je využívána k výrobě cihel a přebytky jsou rovněž ukládány, stejně jako energosádovec. Energetika Vítkovice je držitelem certifikátu pro využití popílku a škváry ke stavebním účelům. Hydrosměs je čerpána do popílkových nádrží mimo areál teplárny a po odvodnění je popílek těžen a využíván odběrateli k rekultivační činnosti nebo ukládán do odvalu [20].

Víceleté studie prokázaly, že přidáním popílku, jako fileru nebo ve větším měřítku jako náhrady určitého množství cementu, do betonové směsi může zlepšit vlastnosti těchto směsí. Některé z těchto zlepšení vycházejí z fyzikálních vlivů, založených na nárůstu podílu jemných částic, zatímco jiná zlepšení jsou vysvětlována chemickým vlivem popílku jako následek jim vyvolaných pucolánových reakcí. Podíl popílku v pojivu betonové směsi závisí na typu popílku. Popílky s nižším obsahem CaO se většinou používají v množství 15 až 25 % hmotnosti pojiva do cementobetonové vozovky (cement a popílek), zatímco popílky s vysokým obsahem CaO se používají v podílu 20 až 35 % popílku v hmotnosti pojiva. Přidáním popílku do betonové směsi se **snižuje množství vody pro přípravu směsi** v porovnání s „klasickými“ cementobetonovými směsmi, čímž se zlepší inženýrské vlastnosti směsi. To je vysvětlováno tím, že granulometrie kameniva a cementu ovlivňuje mezerovitost a tím i požadavky na množství vody. Přidání popílku může způsobit snížení objemu mezer ve směsi a tím i snížit potřeby vody pro dosažení požadované konzistence směsi. Přidáním popílku do směsi hubeného betonu **se zlepší reologické vlastnosti** takových směsí postrádající dostatečný podíl jemných částic. Dalším pozitivním dopadem vycházejícím ze zvýšení podílu jemných částic v betonové směsi přidáním popílku je **snížení odlučování vody** z čerstvé betonové směsi, tzv. „pocení“ betonu. Navíc přidáním popílku do směsi se

zvyšuje její zpracovatelnost, která závisí na soudržnosti a obsahu cementové malty v betonové směsi. Výhodou náhražek cementu v cementobetonových směsích se stejnou hmotností popílku, ale s nižší objemovou hmotností než má beton, je nárůst objemu cementové malty, čímž se zvýší zpracovatelnost směsi. Přidání popílku do směsi **prodlužuje dobu tuhnutí**, zejména u popílků s nižším obsahem CaO a vysokým obsahem uhlíku. Okamžitá pevnost betonových směsí je obvykle nižší, ale v pozdějších fázích tuhnutí může být pevnost betonových směsí s popílkem ještě vyšší než je pevnost referenční betonové směsi. To je výsledkem pomalé pucolánové reakce popílku a vápna, která vzniká při hydrataci cementu. Zatímco se betonové směsi s popílkem používají do prolévaných vrstev vozovky již po mnoho let, používání směsí pro stabilizace s pojivem z popílku a cementu nemá takovou tradici [21].

Když v sedmdesátých letech minulého století vzrostla cena betonu, byl popílek používán v široké míře jako náhrada za určitý podíl cementu ve směsích pro stabilizace. K výběru popílku jako částečné náhrady cementu vedlo mnoho faktorů, i když ten ekonomický byl nejdůležitějším, neboť cena popílku oproti cementu je zanedbatelná. Z dalších faktorů je především pozitivní dopad přidavku popílku do betonových směsí na vlastnosti směsi, jak vyplývá z mnohaletého zkoušení. Očekávalo se, že obdobný dopad bude mít popílek i na kvalitativně nižší, směsi pro stabilizace [21].

Využití popílků v ČR je možné uvést v praktických příkladech:

- materiál pro stavbu komunikací, násypů a zásypů (jako stabilizát)
- aktivní zóna komunikace – obchvat Louny I/7 – popílek z elektrárny Počeradý s 3% CaO, celkové množství uloženého popílku bylo cca 35 – 40 tis. m³, došlo k úspoře nákladů a zrychlení stavby
- násyp tělesa komunikace - rozšíření I/13 Hradec Králové – Pardubice
- dálnice D11 stavba 1105 Osičky – Hradec Králové – do zemního tělesa byla použita elektrárenská struska z elektrárny Opatovice, délka úseku dálnice vystavěného z popílku je 1,5 km, do zemního tělesa bylo použito 0,5 mil. m³
- obsypy mostních konstrukcí – Obchvat Ostrov nad Ohří
- podkladní vrstvy komunikací – satelitní zástavba Jesenice,

- stavba zemních těles hrází – protipovodňové hráze – řeka Morava (Rohatec – Hodonín)
- stabilizace zemní pláně - Hypernova Pardubice
- trať ČD Kněžice – Žatec – rekonstrukce opěry a přílehlého násypu – úprava podloží struskou z elektrárny Počerady, násyp byl vysoký 14 m, horní část násypu tvořil stabilizát (popílek + 3 % CaO), celkem bylo použito 1000 m³ popílku [1,24].

Na následujících obrázcích je vidět praktické využití popílku jako podkladní vrstvy.



Obrázek 8. R6 Louny – obchvat [24]



Obrázek 9. Podkladní vrstva na bázi popílku [1]

V zahraničí je popílek využíván v řádech 10 milionů tun za rok, konkrétní příklady využití jsou následující:

- Haag - divadlo
- Frankfurt – výškové budovy Castor a Pollux
- Madrid – výšková budova Picasso
- Dánsko - most East Bridge – životnost 100 let
- Řecko - přehrady
- Francie komunikace (R47 – Lens)
- Německo - chladičí věže elektráren
- Velká Británie – nádrže na ropu v moři

Struska je využívána jako zásypový materiál a na tvorbu násypů zemních těles pozemních komunikací, zásypy opěrných konstrukcí, zásypy a obsypy liniových staveb, inženýrských sítí, jako ostřivo při výrobě cihlářských pálených výrobků. V roce 2005 – 2007 bylo použito při stavbě dálnice D11 cca 500 tis. tun strusky.

Energosádrovec je jako surovina běžně využíván při výrobě sádrokartonových desek, sádry, při výrobě cementu jako regulátor doby tuhnutí, aktivátor postupu tvrdnutí pórobetonu a dále

Bc. S. Hradecký: Možnosti využití produktů po spalování fosilních paliv jako podkladní konstrukční vrstvy
pozemních komunikací

při výrobě omítkových směsí a stabilizátů. V Nizozemí a některých spolkových zemích v Německu byl energosádrovec vyjmut z katalogu odpadů a prohlášen za druhotnou surovinu rovnocennou přírodnímu sádrovci [1].

4 Technické podmínky pro konstrukční vrstvy

Výstavbu zemních konstrukcí násypů, zásypů a obsypů z popílku řeší v současné době ČSN 736133:2010 „Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací“, kde je definována možnost použití popílku jako alternativního materiálu v určité stavební konstrukci. Při výstavbě zemních konstrukcích zřizovaných v přechodových oblastech mostů a přesýpaných objektů pozemních komunikací se navíc postupuje dle zásad v ČSN 736244 „Přechody mostů pozemních komunikací“. Uvedená ČSN detailně specifikuje konstrukční požadavky, zásady pro vlastní výstavbu včetně limitujících povětrnostních podmínek a opatření při přerušení prací.

Z rezortních předpisů pro provádění a kontrolu kvality prací, které pojednávají o použitelnosti popílku nebo např. o jeho alternativním použití v konkrétním konstrukčním prvku dopravní stavby můžeme jmenovat TP 93 „Technické podmínky - Návrh a provádění staveb pozemních komunikací s využitím popílků a popelů“ (Ministerstvo dopravy, 2011). Tyto technické podmínky platí pro využití popílků a popelů, fluidních popílků ze zbytků po spalování uhlí a výrobků z nich na stavbu pozemních komunikací. Možnost použití stabilizátů z popílku jako ztužující vrstvy v technologii výstavby zemních konstrukcí vrstevnatých násypů byla upřesněna ve zrušených TP 95 „Technické podmínky - Vrstevnaté násypy pozemních komunikací“ (Ministerstvo dopravy, 1997). V TP 146 „Technické podmínky - Povolování a provádění výkopů a zásypů rýh pro inženýrské sítě ve vozovkách pozemních komunikací“, které stanovují kvalitativní parametry, vhodné technologické postupy pro provádění výkopů rýh pro inženýrské sítě a jejich zpětných zásypů v pozemních komunikacích a požadavky na kontrolu prováděných prací, připouští jako zásypový materiál v odůvodněných případech i popílek. Problematikou stabilizátů z fluidních popelů se zabývá ČSN P 72 2080 „Fluidní popel a fluidní popílek pro stavební účely“ a ČSN P 72 2081 - 11 „Fluidní popel a fluidní popílek pro stavební účely. Část 11 - Fluidní popel a popílek pro ostatní využití“ a také ČSN P 72 2081-12 „Část 12 - Fluidní popel a fluidní popílek pro stavbu pozemních komunikací [22].

V následujícím přehledu jsou uvedeny normy, které se vztahují k využívání popílků v dopravním stavitelství:

Navrhování

- **ČSN EN 1997 - 1** Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí – Část 1: Obecná pravidla. Kapitola 5 Násypy, článek 5.3.2 Vhodné násypové materiály mohou zahrnovat většinou zrnité přirozené materiály a určité odpadové materiály, jako jsou vybrané důlní odvaly a popílek z elektráren.

Navrhování vozovek

- **ČSN EN 14227 – 3** Směsi stmelené hydraulickými pojivy – specifikace – Část 3: Směsi stmelené popílkem.
- **ČSN EN 14227 – 4** Směsi stmelené hydraulickými pojivy – specifikace – Část 4: Popílký pro směsi stmelené hydraulickými pojivy.
- **ČSN EN 14227 – 14** Směsi stmelené hydraulickými pojivy – specifikace – Část 14: Zeminy upravené popílkem.
- **ČSN 73 6133** Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací, článek 4.5.1 Popílek.
- **ČSN 73 6244** Přechody mostů pozemních komunikací, článek 5.3 Ochranný zásyp a obsyp, článek 5.4 Zásyp za opěrou a zásyp objektu s přesypávkou, článek 5.5 Samotný přechodový klín, článek 5.7 Násyp v přechodové oblasti [24].

Technické podmínky TP 93 platí pro využití popílků a popelů, fluidních popílků a výrobků z nich na stavbu pozemních komunikací. Stanovují podmínky pro návrh, provádění a kontrolu zemního tělesa, podkladních vrstev a popř. krytu vozovky a podmínky pro bezpečnou práci a ochranu životního prostředí v souvislosti se stavební výrobou i s užíváním objektu. Pro stavby uvedené v těchto podmínkách lze použít plavený popel a popílek nebo popílek ze složišť (odkališť) po dostatečném odvodnění nebo popel či fluidní popílek z odměrných míst přímo v elektrárnách a teplárnách nebo míchacích center. Popílek musí splňovat ekologická kritéria, tj. kvalitu výluhu a hmotnostní aktivitu Ra_{226} [23].

4.1 Ekologická vhodnost

Ekologická vhodnost se posuzuje:

- a) Podle chemických vlastností výluhu uvedené v tabulce 3,

Tabulka 3. **Limitní hodnoty výluhu** [23]

<i>Prvek</i>	<i>Maximálně přípustné množství (mg/l)</i>
Ag	0,1
As	0,1
Ba	1,0
Be	0,005
Pb	0,1
Cd	0,005
Cr celkový	0,1
Co	0,1
Cu	1,0
Ni	0,1
Hg	0,005
Se	0,05
V	0,2
Zn	3,0
Sn	1,0

- b) podle REACH (Registration, Evaluation, Authorisation of Chemicals) – popílký a fluidní popílký musí mít registraci podle nařízení ES 1907/2006 – REACH a nesmí být klasifikovány podle nařízení ES 1272/2008 – CLP (Classification, Labelling and Packaging),
- c) podle mezní hodnoty hmotnostní aktivity Ra_{226} – podle vyhlášky č. 499/2005 Sb., *Vyhláška, kterou se mění vyhláška Státního úřadu pro jadernou bezpečnost č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně*, přílohy 10 nesmí přestoupit hodnotu 1000 Bq.kg^{-1} u staveb s neobytným prostorem. Směrná hodnota obsahu přírodních radionuklidů vyjádřená jako index hmotnostní aktivity $I \leq 20$.

4.2 Technické požadavky na zpracovaný materiál

4.2.1 Zemní těleso (mimo aktivní zónu)

Do zemního tělesa je možné použít popel a popílek těžený ve složišti (odkališti) nad hladinou vody. Při těžbě popílku pod hladinou vody je nutné zpracovat zvláštní technologický předpis. Při použití popílkového stabilizátu je jeho zpracovatelnost ovlivněna rychlostí chemických reakcí, způsobující jeho zpevňování, ty začnou zpravidla již při navlhčení nebo aditivaci produktů. V následujících tabulkách 4 a 5 jsou uvedeny základní průkazní zkoušky popílků a stabilizátu [23].

Tabulka 4. Základní průkazní zkoušky pro těleso násypu [23]

<i>Zkouška</i>	<i>Parametr</i>	<i>Požadovaná hodnota</i>	<i>Norma</i>
Zrnitost*	křivka zrnitosti	není stanovena	ČSN CEN ISO/TS 17892 - 4
Proctor Standard (PS)	max. ρ_d w_{opt}	95 % max. ρ_d	ČSN EN 13286 - 2
Pórovitost*	$n = \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}\right) \cdot 100 (\%)$	$n \leq 65 \%$ při zhutnění 95 %	
Únosnost CBR	index CBR po 4 denním uložení na vzduchu při zabránění odpařování	CBR ₁₀ při 95 % PS u popílků a popelů	ČSN EN 13286 - 47
	index CBR _{sat} po 4 denním sycení vodou	CBR ₁₅ při 95 % PS u fluidních popílků a stabilizátů (po 7 dnech uložení ve vlhku a následném sycení)	
Objemové změny	% bobtnání v CBR	LS ₅	ČSN EN 13286 - 47
Analýza výluhu	zastoupení prvků (mg/l)	viz tab. 3	

*u stabilizátu odpadá

Tabulka 5. Doplnující průkazní zkoušky pro aktivní zónu a další využití [23]

<i>Zkouška</i>	<i>Parametr</i>	<i>Požadovaná hodnota</i>	<i>Norma</i>
Proctor Standard (PS)	max. ρ_d w_{opt}	100 %	ČSN EN 13286 - 2
Pevnost v tlaku*	pevnost v tlaku R_c (MPa)	$C_{1,5/2}$	ČSN EN 14227 - 14
Odolnost proti mraz a vodě	pevnost po nasycení ve vodě (MPa)	$C_{0,8/1}$	
Objemové změny - bobtnání	bobtnání	< 3 %	TP 93 příloha 2
Délka technologické prodlevy	doba tuhnutí	dle TP 93 příl. 4	TP 93 příloha 4
Modul přetvárnosti ze statické zatěžovací desky**	E_{def2}	≥ 45 MPa	ČSN 72 1006 A

*zkouší se po úplném vytvrzení vzorku (7 – 90 dnů) ** zkouší se na technologické vrstvě po zhutnění

4.2.2 Aktivní zóna, ztužující vrstvy násypu, přechodová oblast

Do aktivní zóny, ztužující vrstvy násypu, přechodové oblasti je možné použít pouze popílkový stabilizát, případně fluidní popílek. Čerstvý popílkový stabilizát musí mít minimální vlhkost po dodání na stavbu $w_{0,90}$. Stabilizát nebo fluidní popílek musí vykazovat následující vlastnosti dle ČSN EN 14227 – 14, pevnost v tlaku třídy R_c min. $C_{0,8/1}$, pevnost po nasycení ve vodě $I_{0,6}$ a lineární bobtnání nesmí překročit hodnotu LS_3 . Požadované parametry materiálů obsahují tabulky 4 a 5.

4.2.3 Ochranné a podkladní vrstvy

Do ochranných a/nebo podkladních vrstev lze použít pouze stabilizát. Čerstvý popílkový stabilizát musí mít minimální vlhkost po dodání na stavbu $w_{0,90}$. Stabilizát musí vykazovat následující vlastnosti dle ČSN EN 14227 – 14, pevnost v tlaku třídy R_c min. $C_{1,5/2}$,

Bc. S. Hradecký: Možnosti využití produktů po spalování fosilních paliv jako podkladní konstrukční vrstvy
pozemních komunikací

pevnost po nasycení ve vodě $I_{0,6}$ a lineární bobtnání nesmí překročit hodnotu LS_1 .

V dokumentaci je možné uvést požadavky na min. CBR nebo IBI.

5 Experimentální část

V experimentální části diplomové práce jsem se zaměřil na testování vybraných materiálů na bázi vedlejších energetických produktů s cílem ověřit vhodnost těchto materiálů pro využití v dopravním stavitelství jako konstrukční vrstvy. Vstupní materiály byly vybrány s ohledem na dostupnost v oblasti Mostu. Laboratorní testy byly provedeny v akreditované laboratoři VÚHU a.s.

5.1 Laboratorní testování

Cílem testování bylo ověřit fyzikálně mechanické parametry vybraných granulátů s rozdílným poměrem popílku: produktu z odsíření. Granuláty jsou výrobky z míchacího centra, jedná se o zvlhčené směsi popílku s produktem odsíření. U těchto materiálů byly provedeny následující zkoušky s ohledem na kvalitativní ukazatele uvedené v TP 93:

- vlhkost
- doba tuhnutí
- objemová hmotnost po zhutnění Proctor Standard 100 %
- objemová hmotnost volně sypaná
- zrnitost
- kalifornský poměr únosnosti CBR
- pevnost v tlaku
- odolnost proti mrazu a vodě
- stanovení stopových prvků
- in – situ měření statickou zatěžkávací deskou

5.2 Metodiky analýzy

V této kapitole jsou popsány metodiky analýzy prováděné při testování granulátů v souladu s platnou legislativou.

5.2.1 Vlhkost

Vlhkost se stanovovala podle normy ČSN CEN ISO/TS 17892 – 1 *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 1: Stanovení vlhkosti zemin.*

K provedení této zkoušky potřebujeme sušárnu s nucenou cirkulací vzduchu, schopnou zaručit konstantní teplotu $45 \pm 5^\circ\text{C}$, dále váhy a vysoušecí nádoby.

Postup zkoušky: do čisté, suché, předem zvážené vysoušecí nádoby m_c se vloží zkušební vzorek, uzavře se víčkem a stanoví se hmotnost vysoušecí nádoby se zkušebním vzorkem m_1 . Před vložením vysoušecí nádoby do sušárny se odklopí víčko a nádoba s vlhkým zkušebním vzorkem se vloží do sušárny s teplotním rozsahem $45^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ a vysuší se na ustálenou hmotnost. Po vysušení zkušební vzorku do ustálené hmotnosti se nádoba vyjme ze sušárny, ihned se uzavře a nechá se vychladnout na pokojovou teplotu. Po vychladnutí se stanoví hmotnost uzavřené vysoušecí nádoby m_2 . Vlhkost vzorku w se vypočte ze vzorce 1 [25].

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_c} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

5.2.2 Proctor Standard

Proctor Standard se stanovoval dle normy ČSN EN 13286 – 2 *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti – Proctorova zkouška*. Proctorova objemová hmotnost je objemová hmotnost stanovená ze vztahu objemové hmotnosti suché směsi a vlhkosti získaná zkouškou s hutnicí energií přibližně $0,6 \text{ MJ/m}^3$. Získá se tak Proctorova řada, kdy maximum tvoří optimální objemová hmotnost suchá při optimální vlhkosti. Dalším parametrem je objemová hmotnost po zhutnění 100 %, tzv. PS 100, což je objemová hmotnost vlhkého materiálu při 100 % zhutnění. Postup zkoušky: Hutnění vzorku probíhá v moždíři (norma umožňuje použití 3 moždířů) v závislosti na maximální velikosti zrna. V závislosti na použitém moždíři se volí pěch (jsou 3 typy pěchů). Pro stanovení objemové hmotnosti po zhutnění granulátů se používá pěch A (2,5 kg) a moždíř A ($\varnothing 100,0 \times 120,0 \text{ mm}$, $V = 0,9425 \text{ dm}^3$), výška dopadu pěchu na směs je 305 mm ve 3 vrstvách. Hutnicí zařízení je na následujícím obrázku. Moždíř s připevněnou základní deskou se zváží a zaznamená se hmotnost m_1 . Do moždíře se vloží takové množství směsi, aby vyplnilo jednu třetinu moždíře. Hutní se 25 údery pěchu, který dopadá z výšky 305 mm na povrch směsi při řízení vodící tyčí. Tento postup se opakuje ještě dvakrát, aby množství směsi naplnilo těleso moždíře. Nástavec se poté sejme a přebytečná směs a povrch zhutněné směsi se pravítkem pečlivě zarovná s okrajem moždíře. Materiál a moždíř se základní deskou se zváží a zaznamená se hmotnost

m₂. Při tvorbě Proctorovy řady se takto nahutní minimálně 5 těles. Vlhkosti **w** musí být takové, aby optimální hmotnost, při které dosáhne maximální objemové hmotnosti suché směsi, ležela blízko středu rozmezí. Objemová hmotnost po zhutnění **ρ** se vypočte dle vzorce 2, objemová hmotnost po zhutnění suché směsi **ρ_d** se vypočte dle vzorce 3. [26]

$$\rho = \frac{(m_2 - m_1) \times 1000}{V} \quad (2)$$

$$\rho_d = \frac{(100 \times \rho)}{(100 + w)} \quad (3)$$

Při grafickém vyjádření Proctorovy řady se na osu y vynesou objemové hmotnosti po zhutnění suché směsi **ρ_d** a na osu x se vynesou vlhkost **w**. Součástí grafického vyjádření je křivka saturace, která se vypočte dle vzorce 4, pomocí křivky saturace se mohou odečítat hodnoty vlhkosti při určité objemové hmotnosti po zhutnění, nejčastěji se používá 98% a 95 % míra zhutnění [26].

$$\rho_d = \frac{(1 - 0,01 \times V_a)}{(\rho_s^{-1} + 0,01 \times w \times \rho_w^{-1})} \quad (4)$$

kde ρ_s zdánlivá hustota pevných částic (kg/m³)
 V_a mezerovitost směsi v procentech celkového objemu (0 % mezerovitosti = 100 % saturace směsi)



Obrázek 10. Automatický Proctorův zhutňovač (foto autor)

5.2.3 Zrnitost

Pro hrubozrnnější materiály do velikosti zrna 0,063 mm bylo postupováno podle normy ČSN CEN ISO/TS 17892 – 4 *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 4: Stanovení zrnitosti zemin*, kdy byla provedena síťová analýza, pro jemnozrnné materiály (pod 0,063 mm) byl použit laserový granulometr CILAS 1090 LD. Postup zkoušky byl následující: reprezentativní zkušební vzorek byl nejprve vysušen při teplotě $105 \pm 5^\circ\text{C}$, poté byla zvážena zkušební navážka m . Poté byl vzorek umístěn na laboratorní síta a pomocí vibračního zařízení proběhlo síťování. Veškeré zbytky na sítích byly zváženy $m_1 \div m_n$. Podsítný zbytek pod 0,125 mm byl změřen na laserovém granulometru (viz. obr. 11). Laserový granulometr měří v rozsahu $0,04 - 500\ \mu\text{m}$, měření probíhalo v kapalinovém systému. Změřený vzorek byl poté přepočítán na hodnotu podsítného 0,125 mm (síťováno suchou cestou na sadě sít). [26] Frakce zeminy propadlé jakýmkoliv sítím je vypočtena z rovnice (5). Z výsledků granulometrické analýzy byla vykreslena křivka zrnitosti [27].

$$f_n = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{m} \times 100\% \quad (5)$$

kde f_n je frakce zeminy propadlé sítím (%);
 m_1 hmotnost zeminy propadlé sítím s nejmenším otvorem (g);
 m_2, m_n hmot. zeminy prop. sítím po sobě jdoucími až do zvolené velikosti oka sít (g);
 m celková hmotnost vysušeného zkušební vzorku (g).



Obrázek 11. Laserový granulometr CILAS 1090 (foto autor)

5.2.4 Kalifornský poměr únosnosti CBR

CBR je index používaný pro stanovení charakteristik únosnosti směsi, stanovený ihned po zhutnění nebo po době zrání. IBI (okamžitý index únosnosti) je okamžitá hodnota CBR bez použití zatěžovacího prstence. CBR nebo IBI se vypočte vyjádřením síly na píst pro danou penetraci jako procento standardní síly. Ke stanovení CBR jsou nutná 2 hlavní zařízení, jednak je to Proctorův zhutňovač pro výrobu zkušebního tělesa a pak zatěžovací lis s trnem o \varnothing 50 mm a rychlostí penetrace $1,27 \pm 0,20$ mm/min. Postup zkoušky: těleso se vyrobí v Proctorově zhutňovači v Proctorově formě B (\varnothing 150,0 x 120,0 mm) a pěchu A (2,5 kg) nebo B (4,5 kg). Forma se uloží na spodní tlačnou desku zkušebního zařízení. Pro stanovení CBR se na povrch zkušebního tělesa uloží požadovaný počet přitěžovacích prstenců (prstenec o hmotnosti 2 kg simuluje účinek 700 mm přitížení vozovkou). Měřidlo penetrace se zajistí ve stálé poloze a zaznamená se nulové čtení. Zatěžovací trn se umístí na povrch vzorku se silou do 40 kN při prvním kontaktu. Přírůstek penetrace je nastaven na 1,27 mm/min, zaznamenává se čtení na zařízení na penetračních stupních 0,5 mm do celkové penetrace 10 mm. U grafického vyhodnocení se každá hodnota síly se vynese na osu Y a příslušná penetrace na osu X a těmito body se proloží křivka. Ze zkušební křivky se přečtou síly v kN odpovídající penetraci 2,5 mm a 5,0 mm. Tyto se vyjádří v procentech referenčních sil těchto penetrací, tj. 13,2 kN a 20 kN. Vyšší procento je hodnotou CBR [28].

5.2.5 Pevnost v prostém tlaku

Stanovení pevnosti v tlaku bylo provedeno dle normy ČSN EN 13286 – 41 *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 41: Zkušební metoda pro stanovení pevnosti v tlaku směsí stmelených hydraulickými pojivy*. Ke stanovení pevnosti v tlaku je nutné mít zatěžovací lis. Jedná se o jednoosé zatěžování. Postup zkoušky: Zkušební těleso musí být uloženo ve středu spodní desky lisu. Zatížení se musí zvyšovat stálým a plynulým způsobem bez rázů. Rychlost tlačných desek byla zvolena 0,5 mm/min (jedná se o pevný materiál). Stlačování se zastaví, když osová síla začne klesat. Při stanovení pevnosti v tlaku byl použit lis Fröwag 50 kN (obr. 12), který je plně automatický. V záznamovém listu měření je zaznamenána maximální síla **F**, ze které se poté vypočte pevnost v tlaku, která je dána vzorcem (6). Průřezová plocha **A_c** zkušebních vzorků – válců PS hmoždíř A je 7583,98 mm² [29].

$$R_c = \frac{F}{A_c} \quad [\text{MPa}] \quad (6)$$



Obrázek 12. Lis Fröwag 50 kN (foto autor)

5.2.6 Stanovení doby tuhnutí

Stanovení doby tuhnutí bylo provedeno podle normy ČSN EN 196 – 3 *Metody zkoušení cementu – Část 3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti*. Ke stanovení doby tuhnutí se používá Vicatův přístroj (obr. 13), v laboratoři je k dispozici plně automatický. Součástí Vicatova stroje je Vicatův prstenec, který je z plastu s výškou 40 mm a je kuželovitého tvaru s vnitřním průměrem 75 mm. Postup zkoušky je následující: Vicatův stroj s jehlou o průměru 1,13 mm se uvede do nulové polohy. Vicatův prstenec se naplní testovanou směsí, umístí se na sklíčko a celá tato soustava se umístí do Vicatova stroje. Přístroj se automaticky, navolí se tedy příslušný program testování podle normy ČSN EN 196 – 3. Doba mezi vpichy byla zvolena 30 min, fixní vzdálenost vpichu, zdržení od spuštění měření 0 s. Čištění jehly je automatické, pomocí vatových tyčinek. Výsledky měření jsou uloženy v paměti přístroje a poté vytištěny [30].



Obrázek 13. Vicatův přístroj (foto autor)

5.2.7 Statická zatěžovací deska

Měření statickou zatěžovací deskou je prováděno v souladu s normou ČSN 72 1006 *Kontrola zhutnění zemin a sypanin* a ČSN 73 6190 *Statická zatěžovací zkouška podloží a podkladních vrstev vozovek*. Toto stanovení se používá pro měření statické únosnosti zemin a kameniva nestmelených nebo stmelených, uložených v zemních tělesech, podloží nebo podkladních vrstvách vozovek silničních komunikací, letištních nebo jiných ploch.

Pro provedení statické zatěžovací zkoušky je potřeba zatěžovací zařízení, kdy se používá naložené nákladní auto nebo jiná těžká technika a zatěžovací deska kruhového tvaru, jak je vidět na následujícím obrázku. Mezi další součásti aparatury k měření patří hydraulický lis, kulový kloub, siloměry, hodinkové indikátory, měřicí nosník a pomůcky k urovňování povrchu terénu.



Obrázek 14. Statická zatěžovací deska (foto autor)

Postup zkoušky: povrch zkoušené zeminy musí být rovný a zbaven všech nečistot. Zkouška se neprovádí na zamrzlé zemině. Zatěžovací deska se umístí na vyčištěný povrch, osadí se kulovým kloubem, hydraulickým lisem se siloměrem a mezera mezi lisem a protizátěží se vyplní distančními válečky. Na měřicí nosník se připevní indikátor měření sednutí desky (při měření ve středu desky postačuje 1 indikátor). Měření je automatizováno a vyhodnoceno v software Uniprot. Zatěžované stupně se volí dle podmínek měření v souladu s normou ČSN 72 1006. Vyhodnocení zkoušky je výpočet, kdy se zjišťují modul reakce **k**, statický modul deformace **E₀** a statický modul pružnosti **E**. Modul reakce **k** se zjišťuje statickou zkouškou při použití velké desky, aby celkové průměrné zatlačení desky $f_{tot} \geq 1,27$ mm, vypočte se dle vzorce 7.

$$k = \frac{F}{A \cdot f_{tot}} = \frac{p}{0,00127} \quad (7)$$

kde **F** zatížení desky, vyvolující celkové prům. zatlačení desky $f_{tot} = 1,27$ mm (MN)
 A plocha zatěžovací desky (m²)
 f_{tot} celkové průměrné zatlačení desky, které se rovná 0,00127 m
 p tlak zatěžovací desky na zeminu (MPa)

Pokud se použije menší deska než 798 mm, pak se vypočtený modul násobí součinitelem $d/798$, kde d je průměr zatěžovací desky. Statický modul deformace **E₀** se zjišťuje statickou zkouškou s použitím malé desky ($d = 357$ mm) a je dán výpočtem 8 (obecný vzorec).

$$E_0 = \frac{\pi}{2} (1 - \nu^2) \frac{p \cdot r}{f_{tot}} \quad (8)$$

kde **p** tlak zatěžovací desky na zeminu (zatěžovací stupně jsou voleny v závislosti na požadavcích měření) (MPa)
 ν Poissonovo číslo
 r poloměr zatěžovací desky (m)
 f_{tot} průměrné celkové zatlačení desky při tlaku zatěžovací desky na zeminu (m)
 [31]

Statický modul pružnosti **E** se zjišťuje stejným způsobem jako statický modul deformace **E₀**. Vypočte se ze vzorce 9 (obecný vzorec). Při použití zatěžovací zkoušky při měření ostatních druhů staveb (vodohospodářské stavby, skládky odpadů, průmyslové a jiné stavby) se vypočte modul přetvárnosti dle vzorce 10.

$$E_0 = \frac{\pi}{2} (1 - \nu^2) \frac{P \cdot r}{f_e} \quad (9)$$

kde f_e průměrné pružné zatlačení desky (m) [31]

$$E_{def} = \frac{\pi}{2} (1 - \nu^2) \cdot r \cdot \frac{\Delta p}{\Delta y} \quad (10)$$

kde E_{def} modul přetvárnosti (MPa)

ν Poissonovo číslo

r poloměr zatěžovací desky (m)

Δp změna kontaktního napětí (MPa)

Δy změna zatlačení desky při změně napětí (m) [32]

V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty Poissonova čísla dle ČSN 73 6190.

Tabulka 6. Hodnoty Poissonova čísla [32]

<i>kamenitá sypanina a hrubozrnný štěrk</i>	0,15
střednězrnný štěrk, písčité štěrk	0,20
písek	0,20
písek hlinitý	0,25
hlína písčité a prachovitá	0,30 ÷ 0,35
jíl s nízkou a střední plasticitou	0,35 ÷ 0,37
jíl s vysokou plasticitou	0,40

5.2.8 Odolnost proti mrazu a vodě

Stanovení je stejné jako u pevnosti v tlaku podle normy ČSN EN 13286 – 41, kromě toho se používá mrazící skříň, ve které lze dosáhnout teploty alespoň $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Postup zkoušky je následující: výroba směsi a způsob zrání je stejný jako u zkoušky pevnosti v tlaku. Po 28 dnech zrání se vzorky umístí na plstěnou podložku částečně ležící ve vodě a nechají se kapilárně sytit do ustálené hmotnosti. Tělesa nesmí přijít do přímého styku s vodou. Poté se uloží do mrazící skříně na dobu 6 hodin při teplotách uvedených v tabulce 7. Po zmrazení se zkušební tělesa vyjmou z mrazící skříně a uloží se na dobu 18 hodin zpět na plstěnou podložku částečně ležící ve vodě, aby bylo umožněno další kapilární sycení. Současně probíhá rozmrazování při teplotě $20 \div 25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zkouška se opakuje v předepsaném počtu cyklů (tab. 7). Po skončení posledního cyklu se zkouší pevnost v tlaku podle ČSN EN 13286 – 41 [33].

Tabulka 7. Teploty zmrazování a počty cyklů zmrazování [33]

vrstva vozovky	teplota zmrazování	počet cyklů podle návrhového indexu mrazu dané oblasti		
	°C	do 350	350 ÷ 600	nad 600
horní podkladní vrstva	- 20 ± 2	10	13	16
spodní podkladní vrstva	- 15 ± 2	7	10	13
ochranná vrstva	- 10 ± 2	5	7	10

5.2.9 Obsah stopových prvků

Tato stanovení byla provedena v laboratoři paliv, odpadů a vod VÚHU a.s. Princip stanovení spočívá v homogenizaci (příp. mineralizaci) a stanovení koncentrace stopových prvků metodou atomové absorpční spektrometrie (obr. 15). Stanovení jednotlivých prvků je následovné [34,35]:

Ag

Připraví se 100 násobným ředěním základního roztoku Ag destilovanou vodou. Kalibrační roztok Ag: 10 µg/l. 100 µl pracovního roztoku se nadávkuje do 100 ml odměrné baňky, přidá se 1 ml 65 % HNO₃ a doplní se destilovanou vodou na objem 100 ml. Přístroj dle programu dávkuje potřebné množství kalibračního roztoku.

Technika: elektrotermická atomizace z grafitové kyvety

Vlnová délka: 328,1 nm bez korekce pozadí

Pracovní podmínky přístroje pro stanovení Ag.

Interference: Na potlačení interferencí se používá modifikátor 1 % NH₄H₂PO₄

Mez detekce: < 0,003 mg/l

Mez stanovitelnosti: < 0,01 mg/l

As

Kalibrační roztoky se pipetují do nádobek karuselu, aby výsledný objem v nádobkách byl 6,0 ml, následovně - 1,5 ml kalibračního roztoku, 0,2 ml 30 % roztoku KJ, 4,3 ml 30 % (tj. zředěné v poměru 1:1) HCl. Stejným způsobem se připravují k měření vzorky s tím rozdílem, že se pipetuje 1,5 ml vzorku vody nebo vodného výluhu. Poté se vzorky v nádobkách karuselu zahřejí lampou po dobu 30 minut a jsou připraveny k měření.

Technika: hybridová s elektricky vyhřívanou kyvetou, dávkování peristaltickým čerpadlem s dvěma přídatnými kanály – 1. HCl zředěná 1:1 a 2. NaBH₄ 0,6 %ní roztok s 0,5 % NaOH.

Vlnová délka: 193,7 nm s korekcí pozadí

Pracovní podmínky přístroje pro stanovení As.

Mez detekce: < 0,001 mg/l

Mez stanovitelnosti: < 0,003 mg/l

Ba

90 µl pracovního roztoku se nadávkuje do 100 ml odměrné baňky, přidá se 1 ml 65 % HNO₃ a doplní se destilovanou vodou na objem 100 ml. Přístroj dle programu dávkuje potřebné množství kalibračního roztoku.

Technika: elektrotermická atomizace z grafitové kyvety

Vlnová délka: 553,6 nm bez korekce pozadí

Pracovní podmínky přístroje pro stanovení Ba.

Mez detekce: < 0,002 mg/l

Mez stanovitelnosti: < 0,006 mg/l

Be

400 µl pracovního roztoku se nadávkuje do 100 ml odměrné baňky, přidá se 1 ml 65 % HNO₃ a doplní se destilovanou vodou na objem 100 ml. Přístroj dle programu dávkuje potřebné množství kalibračního roztoku.

Technika: elektrotermická atomizace z grafitové kyvety

Vlnová délka: 234,9 nm s korekcí pozadí

Pracovní podmínky přístroje pro stanovení Be.

Mez detekce: < 0,00004 mg/l

Mez stanovitelnosti: < 0,0002 mg/l

Pb

320 µl pracovního roztoku se nadávkuje do 100 ml odměrné baňky, přidá se 1 ml 65 % HNO_3 a doplní se destilovanou vodou na objem 100 ml. Přístroj dle programu dávkuje potřebné množství kalibračního roztoku.

Technika: elektrotermická atomizace z grafitové kyvety

Vlnová délka: 217,0 nm s korekcí pozadí

Pracovní podmínky přístroje pro stanovení Pb.

Interference: Na potlačení interferencí se používá modifikátor 1 % $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$.

Mez detekce: < 0,001 mg/l

Mez stanovitelnosti: < 0,005 mg/l

Cd

80 µl pracovního roztoku se nadávkuje do 100 ml odměrné baňky, přidá se 1 ml 65 % HNO_3 a doplní se destilovanou vodou na objem 100 ml. Přístroj dle programu dávkuje potřebné množství kalibračního roztoku.

Technika: elektrotermická atomizace z grafitové platformy

Vlnová délka: 228,8 nm s korekcí pozadí

Pracovní podmínky přístroje pro stanovení Cd.

Interference: Na potlačení interferencí se používá modifikátor 1 % $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$

Mez detekce: < 0,0001 mg/l

Mez stanovitelnosti: < 0,0004 mg/l

Cr celkový

Vzorek vody nebo výluhu se zoxидуje přidavkem H_2O_2 a stanoví se Cr celkový metodou AAS. K 100 ml vzorku vody nebo výluhu se přidá 5 ml 30 %ního roztoku H_2O_2 . Roztok se povaří. Po ochlazení na pokojovou teplotu se stanoví Cr celkový metodou AAS stejným postupem jako při stanovení Cr šestimocného. 120 µl pracovního roztoku se nadávkuje do 100 ml odměrné baňky, přidá se 1 ml 65 % HNO_3 a doplní se destilovanou

vodou na objem 100 ml. Přístroj dle programu dávkuje potřebné množství kalibračního roztoku.

Technika: elektrotermická atomizace z grafitové kyvety

Vlnová délka: 357,9 nm s korekcí pozadí

Pracovní podmínky přístroje pro stanovení Cr.

Interference: Na potlačení interferencí se používají mod. 1 g/l Pd + 1 g/l C₆H₈O₆

Mez stanovitelnosti: < 0,04mg/l

Co

Do každé odměrné baňky (objemu 100 ml) s napipetovaným podílem pracovního roztoku se přidá 1 ml koncentrované HNO₃, roztok se doplní destilovanou vodou po rysku a dokonale promíchá.

Technika: Plamenová, nasává se přímo roztok po mineralizaci.

Plamen: acetylén - vzduch, zpětná korekce zapnuta (ON)

Vlnová délka: 240,7 nm

Interference: Nebyly zjištěny žádné významné interference. Ni v koncentraci 1500 ppm (mg/l) snižuje absorpci Co až o 50 %. To lze odstranit použitím plamene - oxid dusný a acetylén.

Mez detekce: < 0,05 mg/l

Mez stanovitelnosti: < 0,09 mg/l

Cu

Do každé odměrné baňky (objemu 100 ml) s napipetovaným podílem pracovního roztoku se přidá 1 ml koncentrované HNO₃, roztok se doplní destilovanou vodou po rysku a dokonale promíchá.

Technika: Plamenová, nasává se přímo roztok po mineralizaci

Plamen: acetylén - vzduch

Vlnová délka: 324,7 nm

Interference: Nebyly nalezeny žádné významné interference. Pouze při vysokém poměru Zn/Cu dochází ke snížení absorpce mědi. To lze odstranit použitím plamene chudého palivem nebo plamene oxidu dusného a acetylénu.

Mez detekce: < 0,02 mg/l

Mez stanovitelnosti: < 0,04 mg/l

Ni

40 µl pracovního roztoku se nadávkuje do 100 ml odměrné baňky, přidá se 1 ml 65 % HNO₃ a doplní se destilovanou vodou na objem 100 ml. Přístroj dle programu dávkuje potřebné množství kalibračního roztoku.

Technika: elektrotermická atomizace z grafitové kyvety

Vlnová délka: 232,0 nm s korekcí pozadí

Pracovní podmínky přístroje pro stanovení Ni.

Interference: Na potlačení interferencí se používají mod. 1 g/l Pd + 1 g/l C₆H₈O₆

Se

Tyto kalibrační roztoky se pipetují do nádobek karuselu, aby výsledný objem v nádobkách byl 6,0 ml, následovně: 3,0 ml kalibračního roztoku a 3,0 ml HCl 30 % (tj. zředěné v poměru 1:1). Stejným způsobem se připravují k měření vzorky s tím rozdílem, že se pipetuje 3,0 ml vzorku vody nebo vodného výluhu.

Technika: hybridová s elektricky vyhřívanou kyvetou, dávkování peristaltickým čerpadlem s dvěma přidavnými kanály – 1. HCl zředěná 1:1 a 2. NaBH₄ 0,6 % roztok s 0,5 % NaOH.

Vlnová délka: 196,0 nm s korekcí pozadí

Pracovní podmínky přístroje pro stanovení Se.

Mez detekce: < 0,001 mg/l

Mez stanovitelnosti: < 0,002 mg/l

80 µl pracovního roztoku se nadávkuje do 100 ml odměrné baňky, přidá se 1 ml 65 % HNO_3 a doplní se destilovanou vodou na objem 100 ml. Přístroj dle programu dávkuje potřebné množství kalibračního roztoku.

Technika: elektrotermická atomizace z grafitové kyvety

Vlnová délka: 318,5 nm bez korekce pozadí

Pracovní podmínky přístroje pro stanovení V.

Mez detekce: < 0,002 mg/l

Mez stanovitelnosti: < 0,006 mg/l

Zn

Do každé odměrné baňky (objemu 100 ml) s napipetovaným podílem pracovního roztoku se přidá 1 ml koncentrované HNO_3 , roztok se doplní destilovanou vodou po rysku a dokonale promíchá.

Technika: Plamenová, nasává se přímo roztok po mineralizaci

Plamen: acetylén-vzduch

Vlnová délka: 213,7 nm

Interference: Nebyly nalezeny žádné významné interference v koncentracích stanovovaných v laboratoři. Při vlnové délce 213,7 nm absorbují ostře neatomické části vzhledem k vysoké koncentraci rozpuštěných látek. Z toho důvodu je nutno provést korekci na neatomickou absorpci, tj. zapnout zpětnou korekci.

Mez detekce: < 0,02 mg/l

Mez stanovitelnosti: < 0,04 mg/l

Sn

200 µl pracovního roztoku se nadávkuje do 100 ml odměrné baňky, přidá se 1 ml 65 % HNO_3 a 0,2 ml kyseliny vinné (50%) a doplní se destilovanou vodou na objem 100 ml. Přístroj dle programu dávkuje potřebné množství kalibračního roztoku.

Technika: elektrotermická atomizace z grafitové kyvety

Vlnová délka: 235,5 nm s korekcí pozadí

Pracovní podmínky přístroje pro stanovení Sn.

Interference: Na potlačení interferencí se používá modifikátor Pd 100mg/l

Mez detekce: -

Mez stanovitelnosti: < 0,01 mg

Hg

Stanovení rtuti se provádí na jednoúčelovém atomovém absorpčním spektrofotometru AMA 254 (obr. 15). Přístroj je určen pro přímé stanovení obsahu rtuti v pevných a kapalných vzorcích bez potřeby chemické předúpravy vzorku (mineralizace ap.). Využitím techniky generování par kovové rtuti s následným zachycením a nabohacením na zlatém amalgátoru se dosahuje mimořádně vysoké citlivosti stanovení nezávislosti výsledku stanovení na matici vzorku. Po dokončení rozkladu vzorku a stabilizaci teploty je změřeno zachycené množství rtuti. Rtuť je z amalgamátoru uvolněna krátkodobým ohřevem. Oblak rtuťových par je nosným plynem unášen přes delší měřící kyvetu (měřeno jako 1. pík). Pak se veškerá rtuť shromáždí ve zpožďovací nádobce a z ní vstupuje do kratší měřící kyvety. Zde je měřena absorbance záření atomy rtuti na vlnové délce 253,65 nm a vyhodnocena metodou externí kalibrace. Jako zdroj záření slouží nízkotlaká rtuťová výbojka, záření prochází interferenčním filtrem a detekováno pomocí polovodičové UV diody.

Mez stanovitelnosti: < 0,0005 mg/l



Obrázek 15. Spektrofotometr AMA 254 (foto autor)

5.3 Testované materiály

Testované materiály byly vybrány s ohledem na dostupnost v oblasti Mostu. Unipetrol RPA, s.r.o. produkuje několik typů granulátů, pro testování byl vybrán typ DE – G1 – EP v poměrech energoproduktu (E) k popílku (P) 1 : 4 a 1 : 5, které byly pro účely DP označeny GU14 a GU15. Granuláty jsou vyráběny z popílku, který vzniká v teplárně T700 a je připravován v míchacím centru. Dalším producentem granulátu je Teplárna Trmice a.s., kde byl pro laboratorní testování vybrán granulát TÚ-ST-KV, poměr E : P = 1 : 2 a 1 : 3, pro účely DP byly označeny GT12 a GT13. Teplárna Trmice má 6 kotlů, ze kterých je popílek přiváděn do míchacího centra a následně upravován na požadovaný granulát nebo jiný produkt. Granuláty jsou certifikované autorizovanou osobou.

Rozsah testování je uveden v kap. 5.1, všechny testy byly provedeny v akreditované laboratoři VÚHU a.s.

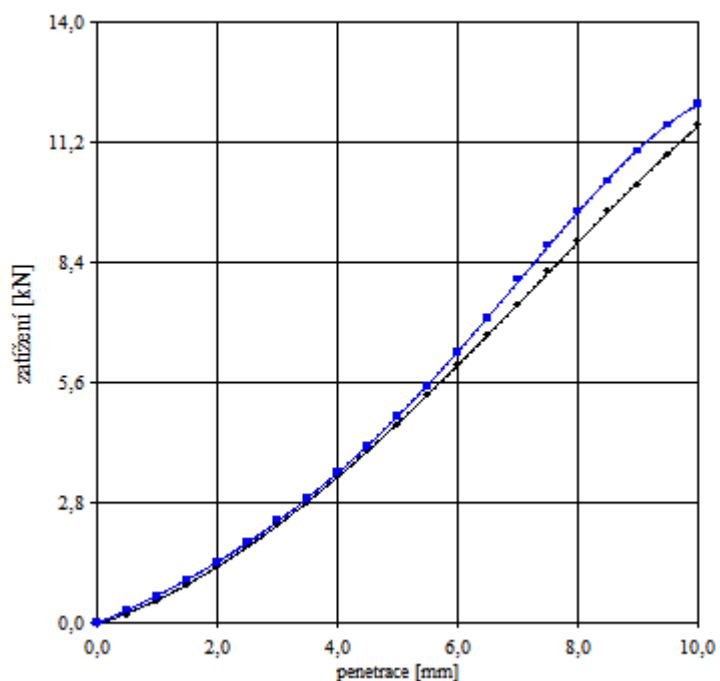
5.4 Výsledky testování

V následujících tabulkách jsou uvedeny výsledky laboratorního testování granulátů. Zkoušky uvedené v následující tabulce byly provedeny do 3 hodin od odběru z důvodu fyzikálně mechanických změn granulátu způsobených tvrdnutím granulátu.

Tabulka 8. Fyzikálně mechanické vlastnosti granulátů

<i>zkouška</i>	<i>jednotka</i>	<i>GT12</i>	<i>GT13</i>	<i>GU14</i>	<i>GU15</i>
vlhkost	%	28,9	21,9	28,3	23,0
obj. hmot. PS100	kg/m ³	1530	1480	1511	1485
obj. hmot. sypná vlhká	kg/m ³	885	870	898	902
zdánlivá hustota p.č.	kg/m ³	2355	2440	2310	2280

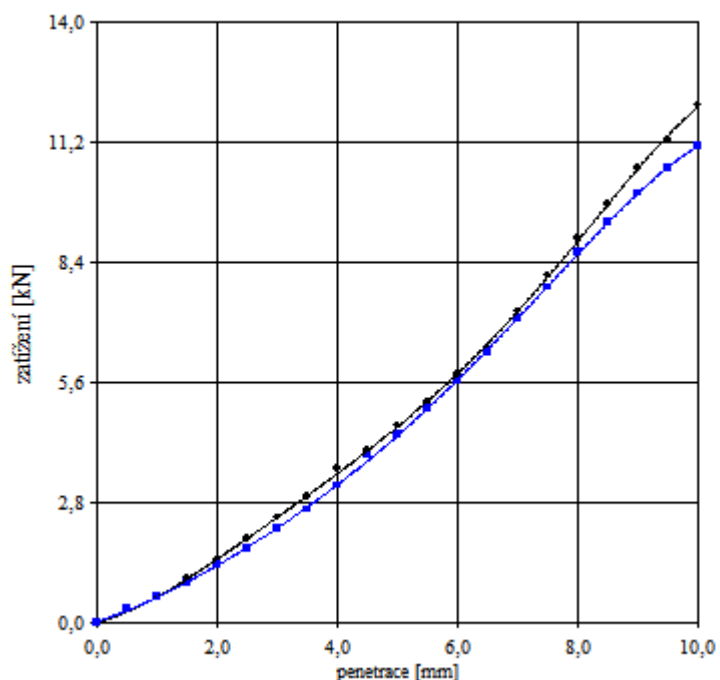
Na následujících obrázcích jsou znázorněny průběhy CBR zkoušek granulátů. Vzorky 7 dní zrály a byly kapilárně syceny vodou.



GT12

čas	pen.	síla	CBR	síla	CBR
min	mm	kN	%	kN	%
2:30	2,5	1,853	14,0	1,928	14,6
5:00	5,0	4,628	23,1	4,925	24,6

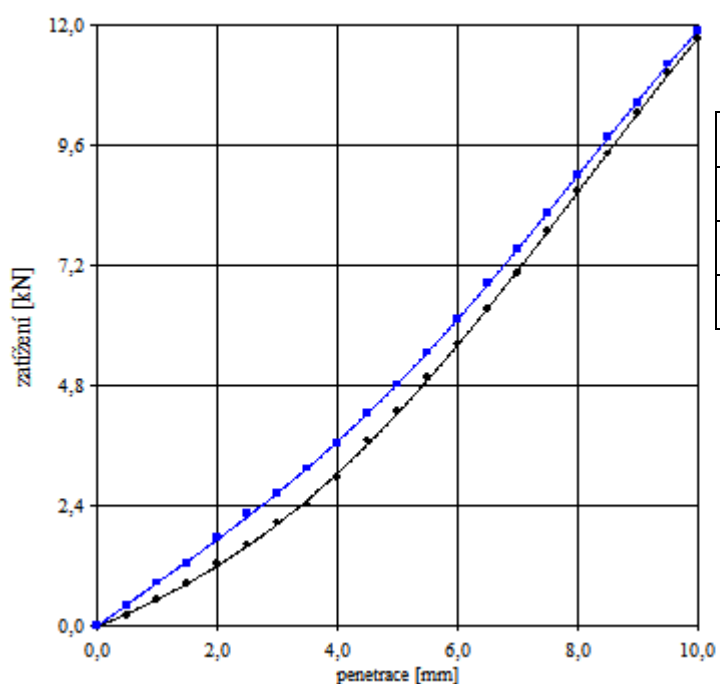
Obrázek 16. CBR vzorku GT12



GT13

čas	pen.	síla	CBR	síla	CBR
min	mm	kN	%	kN	%
2:30	2,5	1,952	14,8	1,742	13,2
5:00	5,0	4,589	22,9	4,402	22,4

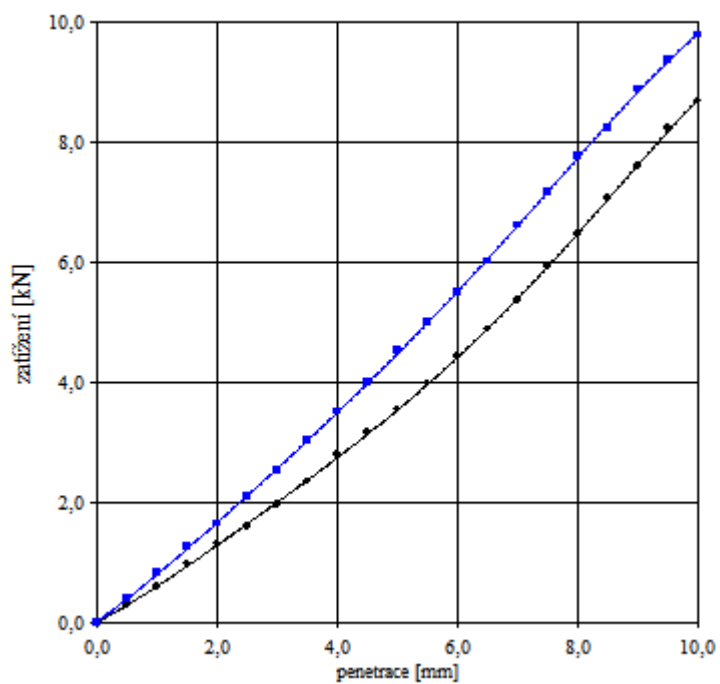
Obrázek 17. CBR vzorku GT13



GU14

čas	pen.	síla	CBR	síla	CBR
min	mm	kN	%	kN	%
2:30	2,5	1,628	12,3	2,233	16,9
5:00	5,0	4,285	21,4	4,825	24,1

Obrázek 18. CBR vzorku GU14



GU15

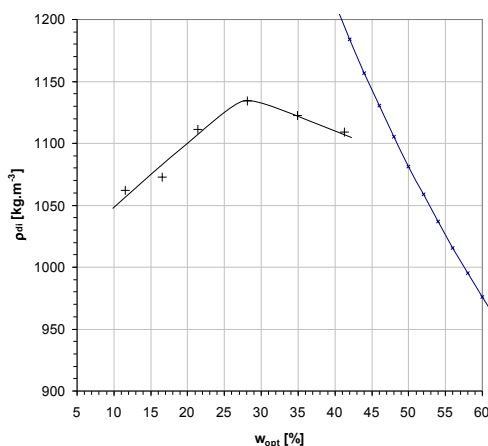
čas	pen.	síla	CBR	síla	CBR
min	mm	kN	%	kN	%
2:30	2,5	1,598	12,1	2,103	15,9
5:00	5,0	3,554	17,8	4,533	22,7

Obrázek 19. CBR vzorku GU15

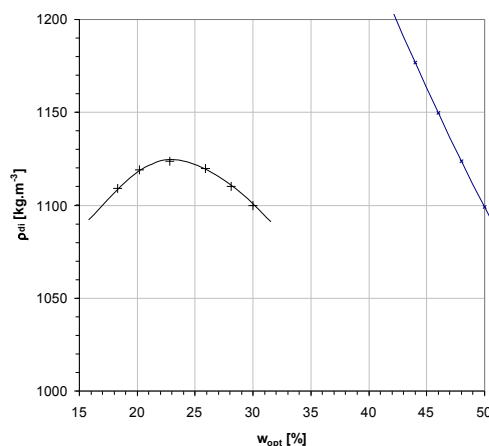
Na následujících obrázcích je znázorněn průběh při stanovení optimální vlhkosti a optimální míry zhutnění PS 100% v Proctorově řadě, hodnoty objemových hmotností a vlhkosti jsou v tabulce 9.

Tabulka 9. Optimální míra zhutnění a vlhkosti PS

<i>parametr</i>		<i>GT12</i>	<i>GT13</i>	<i>GUI4</i>	<i>GUI5</i>
PS100	$\rho_{dmaxPS} [kg.m^{-3}]$	1135	1125	1215	1185
	$w_{opt} [\%]$	28,0	23,0	27,5	22,0
PS97	$\rho_{dmaxPS} [kg.m^{-3}]$	1101	1091	1179	1150
	$w_{opt} [\%]$	31,0	25,5	30,0	24,0
PS95	$\rho_{dmaxPS} [kg.m^{-3}]$	1078	1069	1154	1126
	$w_{opt} [\%]$	32,0	26,0	31,5	26,0

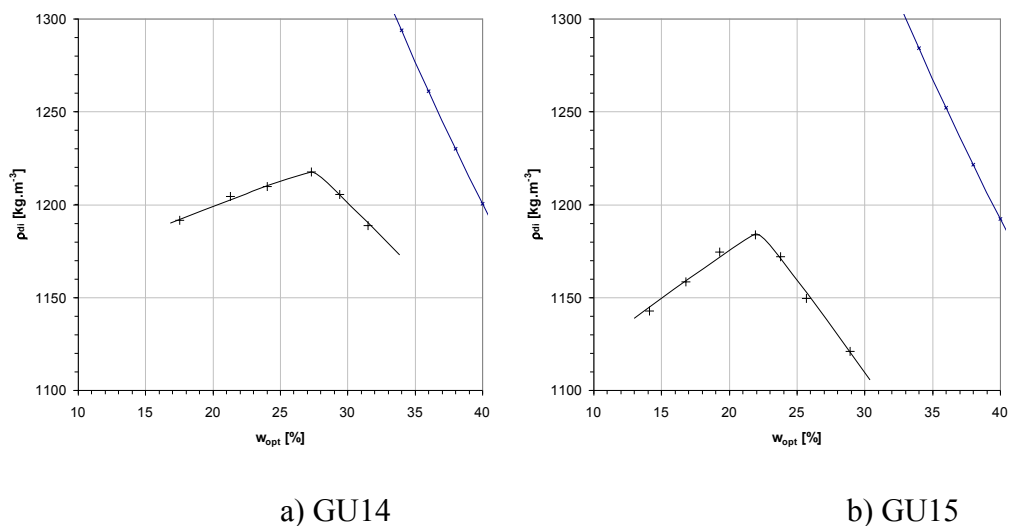


a) GT12



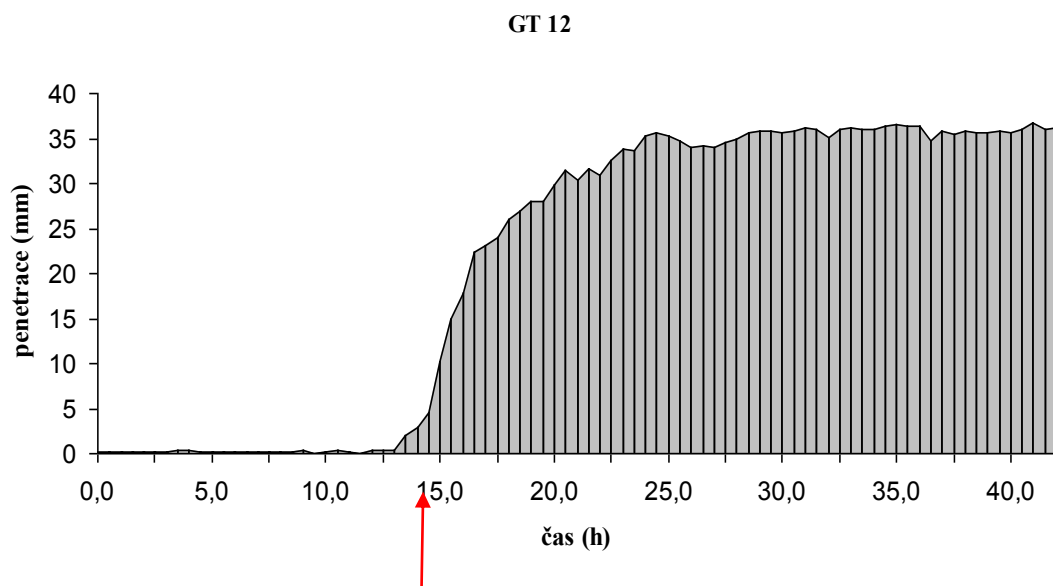
b) GT13

Obrázek 20. PS řada granulátu GT



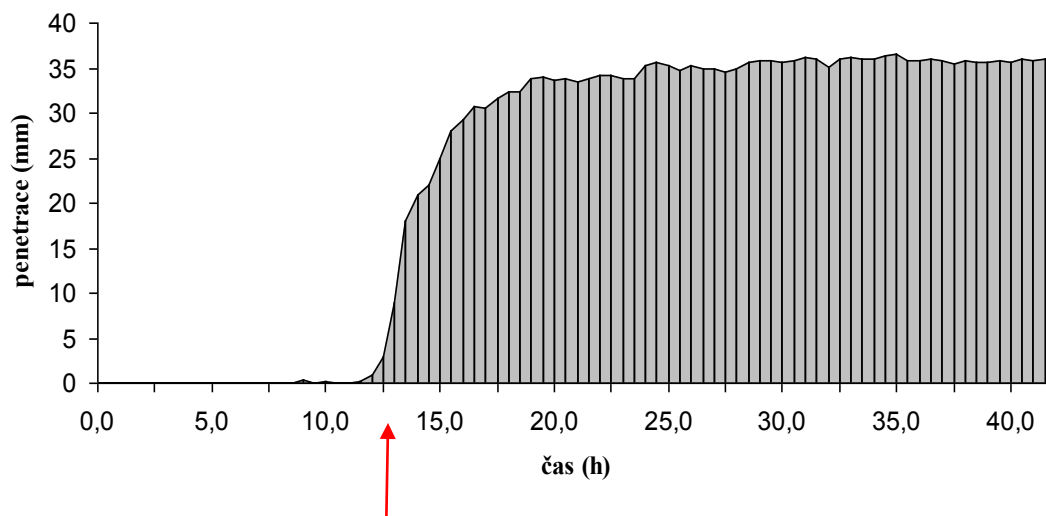
Obrázek 21. PS řada granulátu GU

Na následujících obrázcích jsou znázorněny doby tuhnutí jednotlivých granulátů.



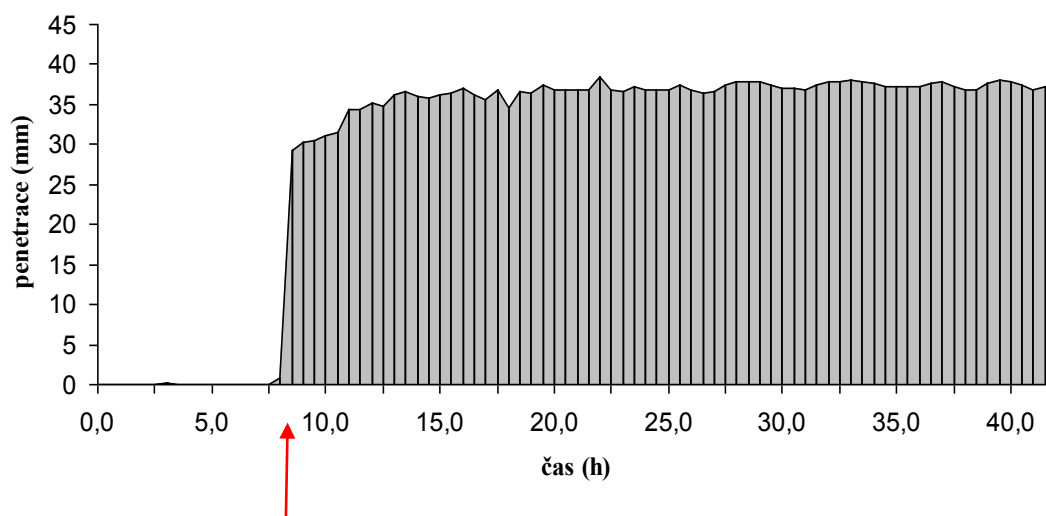
Obrázek 22. Doba tuhnutí granulátu GT12

GT 13



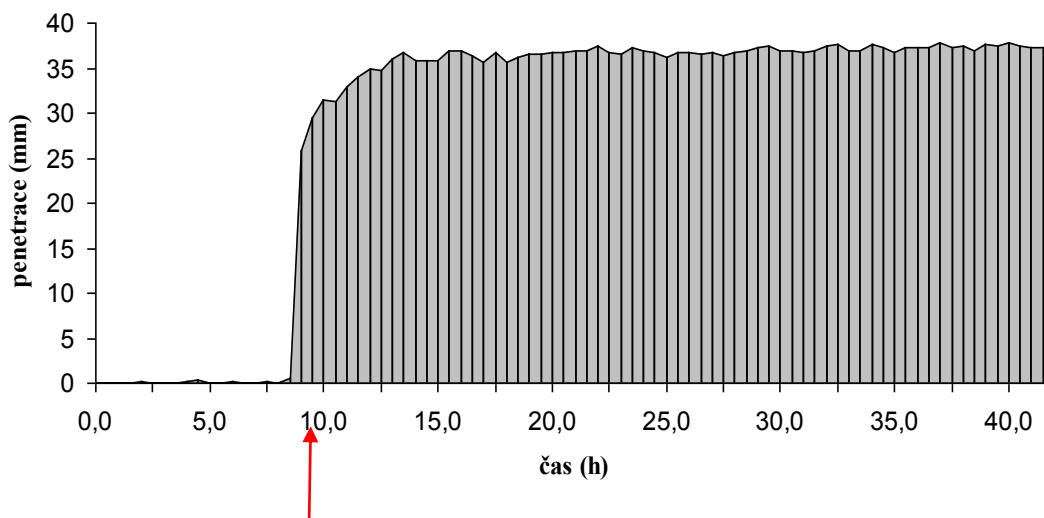
Obrázek 23. Doba tuhnutí granulátu GT13

GU 14



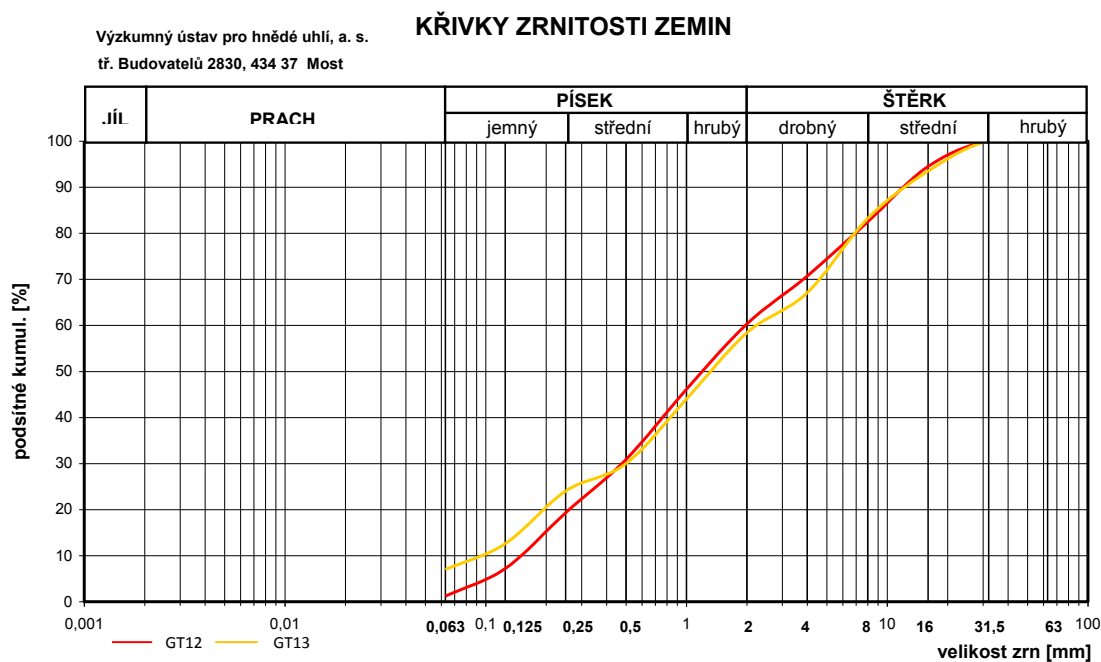
Obrázek 24. Doba tuhnutí granulátu GU14

GU 15

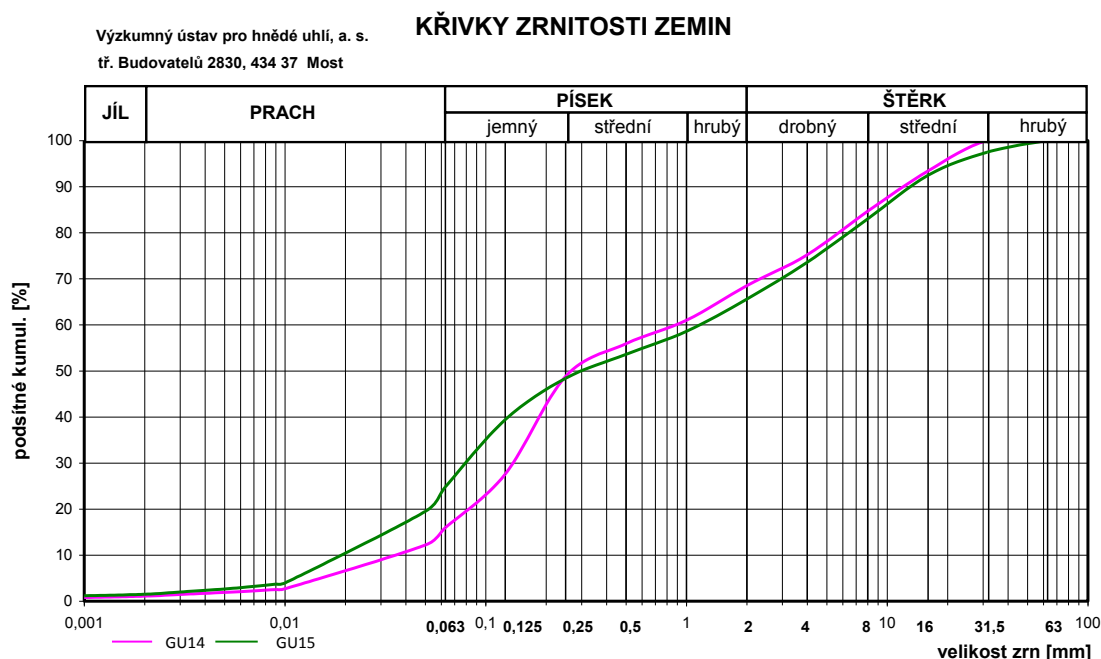


Obrázek 25. Doba tuhnutí granulátu GU15

Obrázky 26 a 27 ukazují zrnitostní složení granulátů.



Obrázek 26. Zrnitost granulátu GT



Obrázek 27. Zrnitost granulátu GU

V následujících tabulkách jsou uvedeny pevnostní charakteristiky granulátů a výsledky zkoušky odolnosti proti mrazu.

Tabulka 10. Pevnost v tlaku GT12 po 28 dnech zrání ve vlhkém prostředí

Čís. těl.	Výška vzorku [mm]	Průměr vzorku [mm]	Rychlost stlačení [MPa.s ⁻¹]	Zatěžovací síla [N]	Pevnost v tlaku R_c [MPa]	PRŮMĚR R_c [MPa]
1	120	100	0,5	17230	2,194	2,240
2	120	100	0,5	17000	2,165	
3	120	100	0,5	18350	2,336	

Tabulka 11. Odolnost proti mrazu GT12 – 5 cyklů

Číslo vzorku	Výška vzorku	Průměr vzorku	Svislá deformace	Poměrná svislá deformace	Průměrná průřezová plocha	Osová síla	Pevnost v prostém tlaku	Modul přetvárnosti
	h_p [mm]	d_p [mm]	Δh [mm]	ε_i [1]	A [mm ²]	F [N]	q_u [MPa]	E_{def} [MPa]
1	120	100	0,82	0,007	7908,02	14896	1,884	465,361
2	120	100	0,62	0,005	7894,77	9325	1,181	416,262

Tabulka 12. Pevnost v tlaku GT13 po 28 dnech zrání ve vlhkém prostředí

<i>Čís. těl.</i>	<i>Výška vzorku [mm]</i>	<i>Průměr vzorku [mm]</i>	<i>Rychlost stlačení [MPa.s⁻¹]</i>	<i>Zatěžovací síla [N]</i>	<i>Pevnost v tlaku R_c [MPa]</i>	<i>PRŮMĚR R_c [MPa]</i>
1	120	100	0,5	16250	2,069	2,154
2	120	100	0,5	17150	2,184	
3	120	100	0,5	17350	2,209	

Tabulka 13. Odolnost proti mrazu GT13 – 5 cyklů

<i>Číslo vzorku</i>	<i>Výška vzorku</i>	<i>Průměr vzorku</i>	<i>Svislá deformace</i>	<i>Poměrná svislá deformace</i>	<i>Průměrná průřezová plocha</i>	<i>Osová síla</i>	<i>Pevnost v prostém tlaku</i>	<i>Modul přetvárnosti</i>
	<i>h_p [mm]</i>	<i>d_p [mm]</i>	<i>Δh [mm]</i>	<i>ε_i [1]</i>	<i>A [mm²]</i>	<i>F [N]</i>	<i>q_u [MPa]</i>	<i>E_{def} [MPa]</i>
1	120	100	0,80	0,007	7906,69	10089	1,267	433,278
2	120	100	0,78	0,007	7905,37	12388	1,568	423,075

Tabulka 14. Pevnost v tlaku GU14 po 28 dnech zrání ve vlhkém prostředí

<i>Čís. těl.</i>	<i>Výška vzorku [mm]</i>	<i>Průměr vzorku [mm]</i>	<i>Rychlost stlačení [MPa.s⁻¹]</i>	<i>Zatěžovací síla [N]</i>	<i>Pevnost v tlaku R_c [MPa]</i>	<i>PRŮMĚR R_c [MPa]</i>
1	120	100	0,5	18520	2,358	2,403
2	120	100	0,5	19420	2,473	
3	120	100	0,5	18670	2,377	

Tabulka 15. Odolnost proti mrazu GU14 – 5 cyklů

Číslo vzorku	Výška vzorku	Průměr vzorku	Svislá deformace	Poměrná svislá deformace	Průměrná průřezová plocha	Osová síla	Pevnost v prostém tlaku	Modul přetvárnosti
	h_p [mm]	d_p [mm]	Δh [mm]	ε_i [1]	A [mm ²]	F [N]	q_u [MPa]	E_{def} [MPa]
1	120	100	1,07	0,009	7924,64	10250	1,293	231,746
2	120	100	1,18	0,010	7931,98	10019	1,263	207,934

Tabulka 16. Pevnost v tlaku GU15 po 28 dnech zrání ve vlhkém prostředí

Čís. těl.	Výška vzorku [mm]	Průměr vzorku [mm]	Rychlost stlačení [MPa.s ⁻¹]	Zatěžovací síla [N]	Pevnost v tlaku R_c [MPa]	PRŮMĚR R_c [MPa]
1	120	100	0,5	19580	2,493	2,462
2	120	100	0,5	17590	2,240	
3	120	100	0,5	20850	2,655	

Tabulka 17. Odolnost proti mrazu GU15 – 5 cyklů

Číslo vzorku	Výška vzorku	Průměr vzorku	Svislá deformace	Poměrná svislá deformace	Průměrná průřezová plocha	Osová síla	Pevnost v prostém tlaku	Modul přetvárnosti
	h_p [mm]	d_p [mm]	Δh [mm]	ε_i [1]	A [mm ²]	F [N]	q_u [MPa]	E_{def} [MPa]
1*	120	100	0,60	0,005	7893,45	7661	0,971	292,617
2	120	100	0,59	0,005	7892,79	11073	1,403	459,100

* Zkušební těleso vykazovalo porušenost trhlinami - pouze informativní hodnota

V následující tabulce 18 je přehled výsledků vyluhovatelnosti granulátů.

Tabulka 18. Vyluhovatelnost granulátů

<i>Prvek</i>	<i>MPM*</i> <i>(mg/l)</i>	<i>GT12</i>	<i>GT13</i>	<i>GU14</i>	<i>GU15</i>
Ag	0,1	0,004	0,005	0,027	0,017
As	0,1	0,018	0,016	0,098	0,086
Ba	1,0	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002
Be	0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Pb	0,1	<0,0004	<0,0004	<0,0004	<0,0004
Cd	0,005	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Cr celk.	0,1	<0,09	<0,09	<0,09	<0,09
Co	0,1	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04
Cu	1,0	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04
Ni	0,1	<0,0005	<0,0005	0,00054	<0,0005
Hg	0,005	<0,002	<0,002	0,0021	0,0036
Se	0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
V	0,2	0,037	0,039	0,014	<0,006
Zn	3,0	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04
Sn	1,0	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

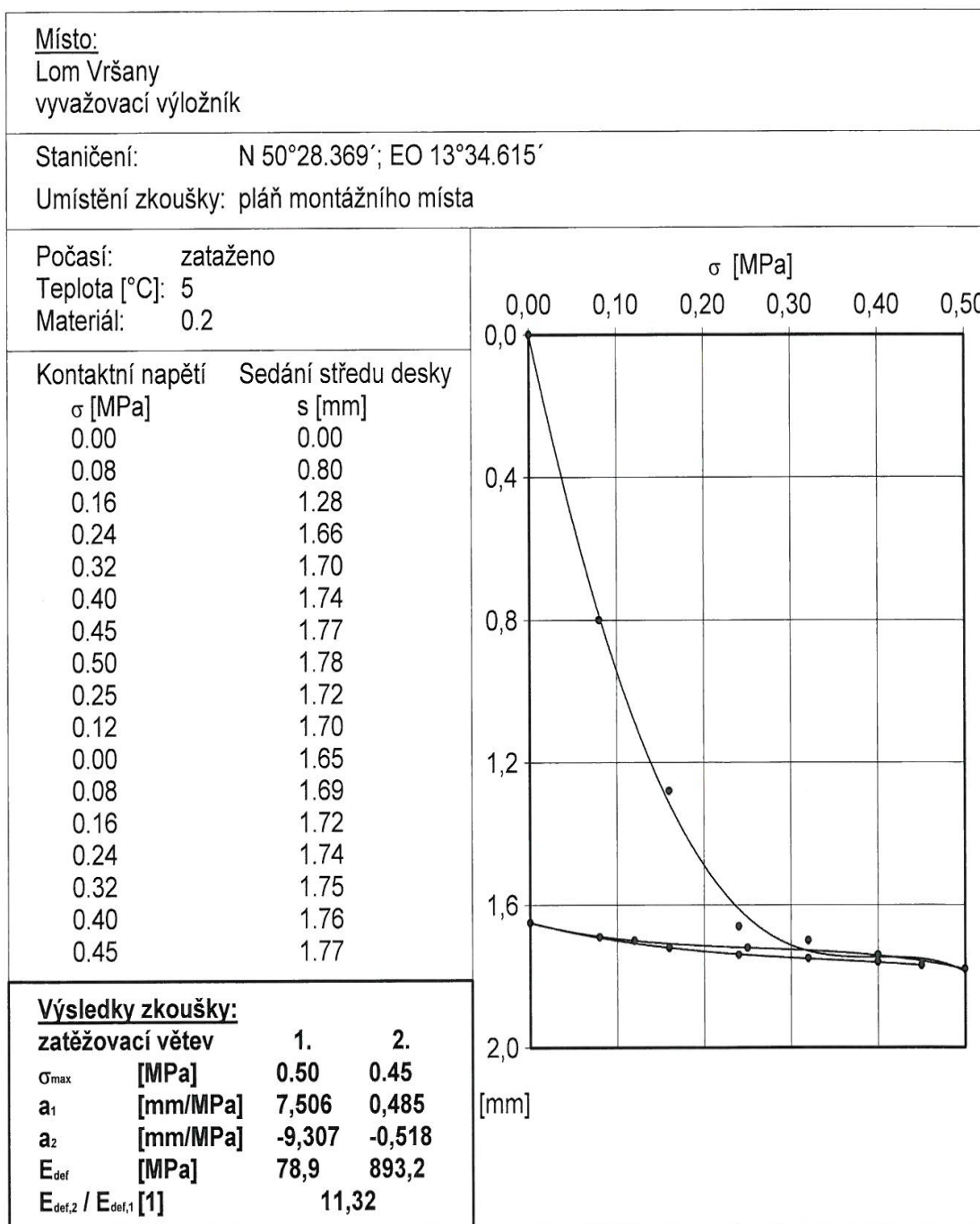
*MPM - maximální přípustná mez

V následující tabulce jsou uvedeny výsledky měření statickou zatěžovací deskou na montážním místě, které je na obr. 29. Obrázek 28 zobrazuje grafické znázornění průběhu měření statickou zatěžovací deskou.

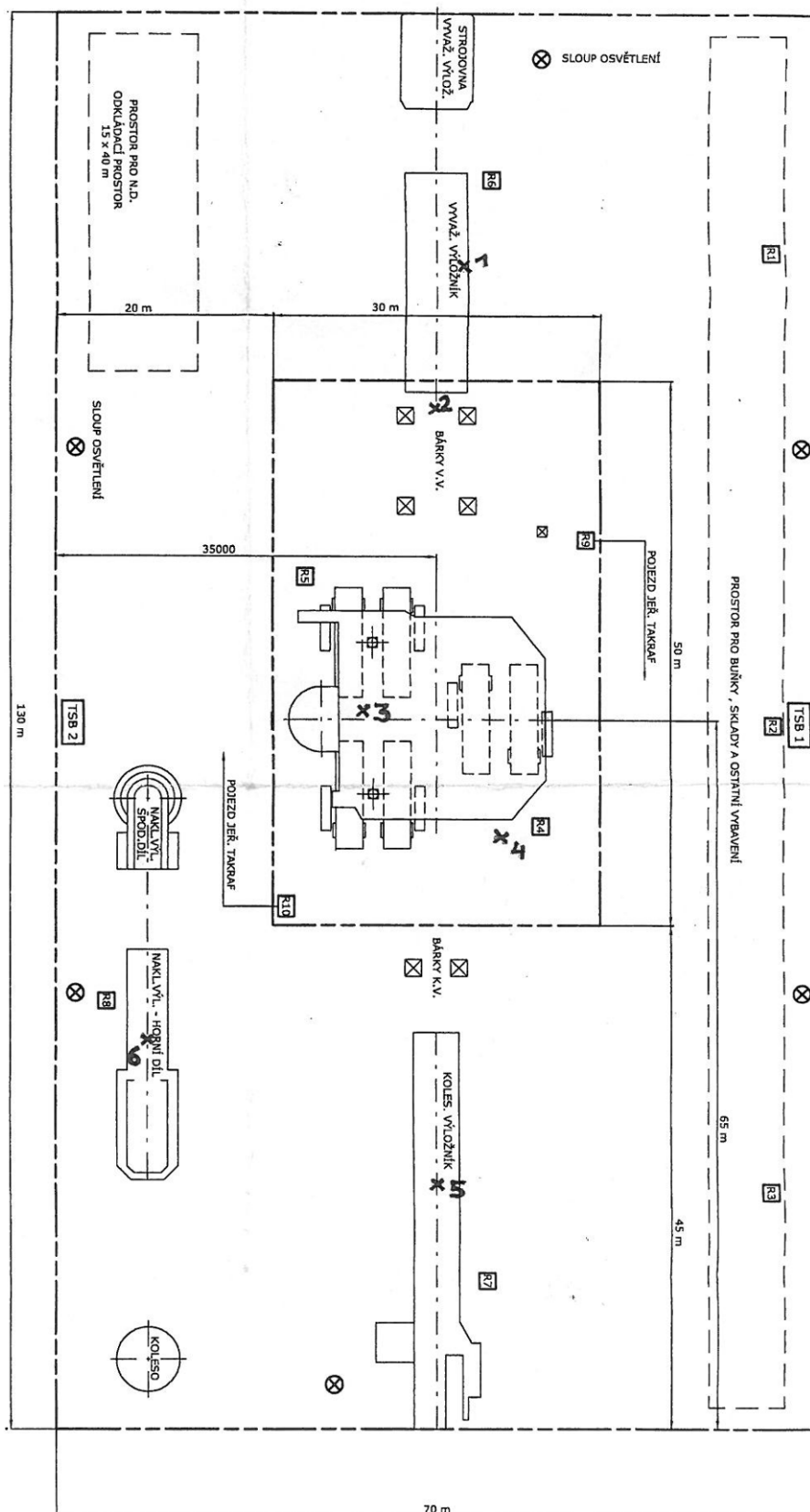
Tabulka 19. Výsledky měření statickou zatěžovací deskou

měř. místo	zatěžovací větev			
			1	2
1	σ_{\max}	MPa	0,50	0,45
	a_1	mm/MPa	7,506	0,485
	a_2	mm/MPa	-9,307	-0,518
	E_{def}	MPa	78,9	893,2
	$E_{\text{def}2}/E_{\text{def}1}$	1	11,32	
2	σ_{\max}	MPa	0,50	0,45
	a_1	mm/MPa	8,695	1,043
	a_2	mm/MPa	-7,204	-0,203
	E_{def}	MPa	44,2	236,4
	$E_{\text{def}2}/E_{\text{def}1}$	1	5,35	
3	σ_{\max}	MPa	0,50	0,45
	a_1	mm/MPa	6,940	1,379
	a_2	mm/MPa	-5,536	-0,692
	E_{def}	MPa	53,9	210,8
	$E_{\text{def}2}/E_{\text{def}1}$	1	3,91	
4	σ_{\max}	MPa	0,50	0,45
	a_1	mm/MPa	6,522	2,665
	a_2	mm/MPa	-5,382	-3,498
	E_{def}	MPa	58,7	206,3
	$E_{\text{def}2}/E_{\text{def}1}$	1	3,51	

5	σ_{\max}	MPa	0,50	0,45
	a_1	mm/MPa	11,863	1,567
	a_2	mm/MPa	-8,568	-0,718
	E_{def}	MPa	29,7	180,9
	$E_{\text{def}2}/E_{\text{def}1}$	1	6,09	
6	σ_{\max}	MPa	0,50	0,45
	a_1	mm/MPa	7,789	1,170
	a_2	mm/MPa	-5,111	-0,419
	E_{def}	MPa	43,0	229,3
	$E_{\text{def}2}/E_{\text{def}1}$	1	5,33	



Obrázek 28. Průběh zkoušky statické zat. desky měřicího místa 1



Obrázek 29. Schéma montážního místa s vyznačenými body měření

5.5 Diskuse

Cílem diplomové práce bylo popsat a otestovat produkty po spalování fosilních paliv a ověřit jejich využití v dopravním stavitelství, konkrétně v konstrukčních vrstvách komunikací. V rámci testování byly na 4 vzorcích granulátu ověřeny fyzikálně mechanické vlastnosti, vč. vyluhovatelnosti chemických prvků. V další fázi byl vybraný typ granulátu GU14 ověřen in-situ, kdy bylo umožněno změřit pomocí statické zatěžovací desky montážní místo lokalizované na pláni lomu Vršany. Výsledkem bylo ověření mechanických vlastností granulátu in-situ.

Jak je patrné z tabulky 8, granuláty jsou zavlhčené směsí popílku a produktu odsíření, kdy vlhkost se pohybovala mezi $20 \div 30 \%$, objemové hmotnosti po zhutnění PS100 jsou hodnotově podobné, rozdíl mezi jednotlivými granuláty je maximálně 50 kg/m^3 . Objemové hmotnosti volně sypané jsou rovněž velmi podobné, pohybují se v intervalu od $885 \div 902 \text{ kg/m}^3$. Zdánlivá hustota pevných částic se odvíjí od množství nečistot, podílu popílku a produktu odsíření ve směsi, hodnoty se pohybují od $2280 \div 2440 \text{ kg/m}^3$. Hodnoty kalifornského poměru únosnosti CBR jsou uvedeny v na obrázcích $16 \div 19$ a je možné konstatovat, že dosažené hodnoty jsou v úzkém intervalu pohybující se od $22,7 \div 24,1 \%$. V tabulce 9 jsou uvedeny hodnoty optimálního zhutnění a optimální vlhkosti. Mezi jednotlivými směsmi producenta granulátu je rozdíl v optimální vlhkosti 5% , nižší poměr popílku ve směsi potřebuje více vody. Rozdíl mezi optimálním zhutněním granulátu GT je 10 kg/m^3 , u granulátu GU 30 kg/m^3 . Rozdíl mezi ztuhnutím směsi je patrný na obrázcích $22 \div 25$. Nejdéle tuhne granulát GT12, kdy tělísko ztuhlo po 13 hodinách. Nejkratší dobu na ztuhnutí potřeboval granulát GU14, kdy stačilo 7,5 hodiny do ztuhnutí. Tato charakteristika je způsobena jednak pucolánovými vlastnostmi samotných popílků, jednak chemickým složením produktů z polosuché metody odsíření a přítomností složek hydroxidových, síranových a uhličitánových. Bohužel nebyl umožněn odběr vstupních komponent výroby granulátů u jednotlivých producentů tak, aby mohly být následnými chemickými rozborů těchto složek potvrzeny zjištěné rozdíly dob tuhnutí jednotlivých typů granulátů.

Rozdíl mezi produkovánými granuláty je v zrnitosti. Zatímco granulát GT obsahuje cca. 40% šterkovitých zrn a 60% písčitých zrn, tak granulát GU je jemnozrnější materiál, kdy šterková zrna jsou obsažena cca 35% , písková do 50% a prachová zrna do 15% . Zrnitost je znázorněna na obrázcích 26 a 27, kde jsou patrné rozdíly mezi jednotlivými granuláty. Tabulky $10 \div 17$ jsou zaměřeny na pevnostní charakteristiku jednotlivých

granulátů, kdy jsou zde uvedeny hodnoty jednak pevnosti v tlaku a dále výsledky odolnosti proti mrazu a vodě, které jsou vyjádřeny jako pevnosti v prostém tlaku po 5 cyklovém zmrazování a rozmrazování. Z hodnoty lze vyčíst, že granuláty vesměs dosahují pevnosti nad 2 MPa, ovšem výraznější rozdíly mezi nimi nejsou. Odolnost proti mrazu a vodě je v tomto hledisku obdobná, výsledné pevnosti dosahovali maxim do 1,5 MPa. U granulátu GU15 došlo k výraznějšímu porušení tělesa vlivem mrazu a hodnota označená hvězdičkou je brána jen jako ilustrační, byť byla dosažena ucházející pevnost v prostém tlaku.

Poslední fází testů granulátů bylo jejich ověření in-situ měřením. V rámci experimentálních prací bylo provedeno měření na pláni montážního místa lokalizované v lomu Vršany, kdy tato plán byla připravena pro opravu velkorypadla KU800. Jako konstrukční materiál byl zde použit granulát, který byl uválcován na vrstvě kameniva, jak je vidět v následujícím obrázku. Je zde vidět cca. 0,5 m silná vrstva granulátu, která je umístěna na zhutněném povrchu zeminového tělesa. Horní vrstva je tvořena hutněnou vrstvou šterkozeminy. V rámci měření bylo vytyčeno 6 míst a výsledky z měření jsou v tabulce 19.



Obrázek 30. Řez konstrukční vrstvou montážního místa

Z výsledků měření je vidět, že se jedná o plochu s velmi dobrou pevností, maximální pokles zjištěný během měření byl z místa 5, kdy prvotní zatlačení desky, při max. osovém tlaku 0,5 MPa, bylo zjištěno v hodnotě maximálního poklesu 4,38 mm v první větvi měření, při odlehčení a následném zatlačení desky při max. osovém tlaku 0,45 MPa byl maximální pokles cca 0,58 mm. Z toho se dá usuzovat, že z důvodů klimatických změn je vrchní vrstva mírně narušena a při tlakovém zatěžování dochází k jemnému zaboření tlačné desky, které však není

nijak výrazné. Při opětovném zatlačení na vrstvu je boření už jen v řádech desetiny milimetru, proto bylo dosaženo vysokých deformačních modulů $E_{\text{def}2}$.

Z hlediska vyluhovatelnosti je granulát bezpečným materiálem nezatěžující životní prostředí. Těžké kovy jsou pevně uchyceny v matici granulátu a nedochází k vyloužení do okolního prostředí. Granuláty po zhutnění tvoří prakticky nepropustné prostředí s koeficientem filtrace $k \approx 10^{-9} \div 10^{-8}$.

6 Závěr

Diplomová práce je zaměřena na možnosti využití granulátů v dopravním stavitelství do konstrukčních vrstev. Hlavním předpisem, kterým je nutné se řídit při takovém využití je TP 93, který předpisuje vybrané zkoušky na produkty po spalování fosilních paliv a zároveň předepisuje minimální hodnoty, kterých musí být dosaženo.

V rámci experimentální části diplomové práce byly testovány 4 druhy granulátu s rozdílným poměrem popílku a produktu odsíření kouřových spalin. Byli vybráni 2 producenti, s ohledem na dostupnost v oblasti Mostecka a tyto granuláty v souladu s TP 93 byly otestovány s cílem zjistit jejich fyzikálně – mechanické vlastnosti. Mezi hlavní limitující faktor využití granulátu patří doba tuhnutí, kdy tyto materiály po určité době ztrácejí své vlastnosti pro optimální technologické zpracování, a proto je nutné je hned po výrobě zpracovat, aby bylo dosaženo nejlepších konečných vlastností po vyzrání materiálů. Rychlost tuhnutí určuje mnoho faktorů, jedním z nich je podíl příměsi produktu po odsíření kouřových spalin, jehož chemické složení je ovlivňováno zejména nastavením samotného odsiřovacího procesu ve vazbě na parametry spalovaného uhlí. Chemické složení pak ovlivňuje nastartování pucolánových vlastností samotných popílků při výrobě granulátů. Z výsledků uvedených v kapitole 5.4 lze konstatovat, že granulát GT tuhne pomaleji. Z fyzikálně mechanických vlastností lze vypořádat, že zde nejsou markantní rozdíly mezi granuláty. Největší rozdíl je v době tuhnutí a zrnitosti. Granulát GU je jemnozrnější. Po vysušení vzorku se granule rozpadají na jemnozrné částice. Mimo laboratorní testování bylo provedeno jedno měření in-situ, na místě, kde byl do konstrukční vrstvy použit granulát. K ověření vhodnosti byla použita zkouška statického zatěžování deskou. Na 6 místech byl změřen deformační modul, a lze konstatovat, že použitý granulát splňuje veškeré předpoklady vyššího zatížení.

Konstrukční materiály na bázi produktů po spalování jsou velmi vhodné pro dopravní stavitelství. Při správné aplikaci je dosaženo velmi dobrých výsledků bez chemického ohrožení životního prostředí a zároveň, využití produktů po spalování fosilních paliv umožňuje šetřit přírodní materiály, které je možné nahrazovat ve velké míře právě např. granuláty. Limitujícím faktorem použití je pouze doba tuhnutí granulátu a samozřejmě velký vliv má spalované uhlí a technologie spalování. Spalování nekvalitního uhlí se projeví i

Bc. S. Hradecký: Možnosti využití produktů po spalování fosilních paliv jako podkladní konstrukční vrstvy
pozemních komunikací

v kvalitě popílku a výsledný granulát může vykazovat horší vlastnosti. Proto je nutné neustále sledovat kvalitu popílku pro výrobu granulátu.

7 Literatura

1. SOKOL, P. *Vedlejší energetické produkty a jejich využití*. [online]. [cit 2013 – 01 – 02]. Dostupný z WWW: < http://www.top-expo.cz/domain/top-expo/files/spsb-2012/prednasky/sokol_pavel.pdf >.
2. *Coal Statistics*. [online]. [cit. 2013-01-08]. Dostupný na WWW: < <http://www.worldcoal.org/resources/coal-statistics/> >.
3. *Uhlí* [online]. [cit. 2013-01-08]. Dostupný na WWW: < <http://cs.wikipedia.org/wiki/Uhl%C3%AD> >.
4. *Coal* [online]. [cit. 2013-01-08]. Dostupný na WWW: < <http://www.indexmundi.com/energy.aspx?product=coal&graph=consumption> >.
5. *Tepelná elektrárna* [online]. [cit. 2013-01-08]. Dostupný na WWW: < http://cs.wikipedia.org/wiki/Tepeln%C3%A1_elektr%C3%A1rna >.
6. *Produkty* [online]. [cit. 2013-01-08]. Dostupný na WWW: < <http://www.cezep.cz/produkty.html> >.
7. BROŽOVSKÝ, J., FOJTÍK, T., MARTINEC, P. *Trvanlivost betonů ve kterých část pojiva byla nahrazena popílky z fluidního spalování lignitu*. Recycling 2006 - Možnosti a perspektivy recyklace stavebních odpadů jako zdroje plnohodnotných surovin, Brno: VUT Brno, 2006. S. 112 – 116. ISBN 80 – 214 – 3142 – 3.
8. *Kotle – 2. část*. [online]. 2. 4. 2012 [cit. 2013-01-08]. Dostupný na WWW: < <http://vytapani.tzb-info.cz/zdroje-tepla/8438-kotle-2-cast> >.
9. FEČKO, P., KUŠNIEROVÁ, M., LYČKOVÁ, B., ČABLÍK, V., FARKAŠOVÁ, A. *Popílky*. Ostrava: VŠB-TU OSTRAVA, 2003. ISBN 80-248-0327-5.
10. MUŽÍK, P., MEDVECOVÁ, J. *Nová surovina – fluidní popílek z tepelné elektrárny Hodonín* [online]. [cit 2012 – 12 – 08]. Dostupný z WWW: <http://www.fce.vutbr.cz/veda/dk2004texty/4_01sekce.asp>.
11. *Výroba elektrické energie* [online]. [cit. 2013-01-08]. Dostupný na WWW: < http://www.sse-najizdarne.cz/vyroba_el_en.html >.

12. LUTZE, D., VOM BERG, W. *Handbuch Flugasche im Beton*. Düsseldorf: Verlag Bau+Technik GmbH, 2008. ISBN 978-3-7640-0502-3.
13. *Struska* [online]. [cit. 2013-01-08]. Dostupný na WWW: <
<http://www.cezep.cz/zakaznický-modul/prispevek/55870.html>>.
14. *Jaké mají odpady z energetiky vlastnosti* [online]. [cit. 2013-01-08]. Dostupný na
WWW: <
http://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=1&ee_chapter=2.6.1>.
15. *Boiler slag* [online]. [cit. 2013-01-08]. Dostupný na WWW: <
<http://www.caer.uky.edu/kyasheducation/boilerslag.shtml>>.
16. *Coal Bottom Ash/Boiler slag – Material Description* [online]. [cit. 2013-01-08].
Dostupný na WWW: < <http://rmrc.wisc.edu/ug-mat-coal-bottom-ashboiler-slag/>>.
17. *Flue-gas desulfurization* [online]. 28.11.2012 [cit. 2013-01-08]. Dostupný na
WWW: < http://en.wikipedia.org/wiki/Flue-gas_desulfurization>.
18. PAVELKOVÁ, L., AYOUBI, K. *Současný stav využívání průmyslových
odpadních materiálů ve stavebních konstrukcích v zahraničí a ČR*. XIth
International Conference of Research Institute of Building Material Ecology and
new building materials and products, Brno: VUSTAH Brno, 2007. ISBN 80-239-
9347-9.
19. *Ve stavebnictví se s úspěchem využívají odpady* [online]. 08/2011 [cit. 2013-01-
08]. Dostupný na WWW: < [http://www.realit.cz/clanek/ve-stavebnictvi-se-s-
uspechem-vyuzivaji-i-odpady](http://www.realit.cz/clanek/ve-stavebnictvi-se-s-uspechem-vyuzivaji-i-odpady)>.
20. *Využití vedlejších produktů* [online]. [cit. 2013-01-08]. Dostupný na WWW: <
[http://www.cez.cz/cs/odpovedna-firma/zivotni-prostredi/programy-snizovani-
zateze-zp/vyuziti-vedlejsich-produktu-uhelnych-elektren.html](http://www.cez.cz/cs/odpovedna-firma/zivotni-prostredi/programy-snizovani-zateze-zp/vyuziti-vedlejsich-produktu-uhelnych-elektren.html)>.
21. *Použití popílku v cementobetonovém krytu pozemní komunikace* [online]. [cit.
2013-01-08]. Dostupný na WWW: <
<http://www.silmos.cz/?doc=infop.clanky&start=0>>.
22. MRÁZ, V. *Vlastnosti popílku při uplatnění do zemních konstrukcí dopravních
staveb*. 13. Odborná konference doktorského studia Fakulty stavební VUT Brno

JUNIORSTAV 2011, Brno: VUT Brno, 2011. s. 101 – 106. ISBN 978-80-214-4232-0.

23. TP 93 „Návrh a provádění staveb pozemních komunikací s využitím popílků a popelů“. SG – Geotechnika, a.s., 2011.
24. HERLE, V. *Využití VEP v dopravě při stavbě komunikací*. [online]. [cit 2013 – 01 – 02]. Dostupný z WWW: <
http://www.asvep.cz.web3.web4ce.cz/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=6&dir=DESC&order=name&Itemid=30&limit=5&limitstart=5 >.
25. ČSN CEN ISO/TS 17892 – 1. *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 1: Stanovení vlhkosti zemin*. Praha: Český normalizační institut, 2005. s. 11.
26. ČSN EN 13286 – 2. *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti – Proctorova zkouška*. Praha: Český normalizační institut, 2011. s. 32.
27. ČSN CEN ISO/TS 17892 – 4. *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 4: Stanovení zrnitosti zemin*. Praha: Český normalizační institut, 2005. s. 30.
28. ČSN EN 13286 – 47. *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 47: Zkušební metoda pro stanovení kalifornského poměru únosnosti, okamžitého indexu únosnosti a lineárního bobtnání*. Praha: Český normalizační institut, 2005. s. 11
29. ČSN EN 13286 – 41. *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 41: Zkušební metoda pro stanovení pevnosti v tlaku směsí stmelených hydraulickými pojivy*. Praha: Český normalizační institut, 2004. s. 11.
30. ČSN EN 196 – 3. *Metody zkoušení cementu – Část 3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti*. Praha: Český normalizační institut, 2009. s. 16.
31. ČSN 73 6190. *Statická zatěžovací zkouška podloží a podkladních vrstev vozovek*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1980. 14s.

32. ČSN 72 1006. *Kontrola zhutnění zemin a sypanin*. Praha, Český normalizační institut, 1998. 49s.
33. ČSN EN 14227 – 14. *Směsi stmelené hydraulickými pojivy – Specifikace – Část 14. Zeminy upravené popílkem*. Praha: Český normalizační institut, 2008. 27 s.
34. Interní metodický předpis IMP002/LACH. *Stanovení stopových prvků ve vodách a vodných výluzích*. Most: VÚHU a.s., 2012. 32 s.
35. Interní metodický předpis IMP004/LACH. *Stanovení rtuti*. Most: VÚHU a.s., 2012. 7s.
36. *Informace o uhlí* [online]. [cit. 2013-02-20]. Dostupný na WWW: <<http://www.uhli.biz/>>.
37. *Analýza využívání stavebních odpadů, odpadů z těžby a energetických odpadů, predikce poptávky po jejich využití*. [online]. [cit. 2013-02-20]. Dostupný na WWW: <http://www.ecmost.cz/odpady/pic/sute_a_popilky.pdf>.
38. *Velkoobjemové využití vedlejších energetických produktů po spalování hnědého uhlí* [online]. [cit. 2013-02-20]. Dostupný na WWW: <http://www.teplarenske-dny.cz/PDFs/KONF_ODPADY_Velkoobjemov%C3%A9%20vyu%C5%BEit%C3%AD%20VP%20po%20spalov%C3%A1n%C3%AD%20hn%C4%9Bd%C3%A9ho%20uhl%C3%AD.pdf>.
39. *Stavební materiály* [online]. [cit. 2013-03-29]. Dostupný na WWW: <<http://www.pe.cz/energie-a-sluzby/stavebni-materialy.htm>>.
40. *Žádost o integrované povolení ČEZ, a.s. – elektrárna Počeradý* [online]. [cit. 2013-03-29]. Dostupný na WWW: <[http://www.mzp.cz/www/ippc.nsf/\\$pid/MZPXXFA11AKM/\\$file/EPC%20-%20%20vyj.%20AIP.doc](http://www.mzp.cz/www/ippc.nsf/$pid/MZPXXFA11AKM/$file/EPC%20-%20%20vyj.%20AIP.doc)>.

8 Seznam obrázků

Obrázek 1. Oblasti využití energetických produktů v ČR [1]	1
Obrázek 2. Světová spotřeba uhlí [4]	3
Obrázek 3. Schéma vzniku popílku [12]	6
Obrázek 4. Granulační kotel [8]	7
Obrázek 5. Fluidní kotel [11]	9
Obrázek 6. Struska [15]	11
Obrázek 7. Schéma odsiřování kouřových spalín [17]	13
Obrázek 8. R6 Louny – obchvat [24]	19
Obrázek 9. Podkladní vrstva na bázi popílku [1]	20
Obrázek 10. Automatický Proctorův zhutňovač	30
Obrázek 11. Laserový granulometr CILAS 1090	31
Obrázek 12. Lis Fröwag 50 kN	33
Obrázek 13. Vicatův přístroj	34
Obrázek 14. Statická zatěžovací deska	34
Obrázek 15. Spektrofotometr AMA 254	43
Obrázek 16. CBR vzorku GT12	45
Obrázek 17. CBR vzorku GT13	45
Obrázek 18. CBR vzorku GU14	46
Obrázek 19. CBR vzorku GU15	46
Obrázek 20. PS řada granulátu GT	47
Obrázek 21. PS řada granulátu GU	48
Obrázek 22. Doba tuhnutí granulátu GT12	48
Obrázek 23. Doba tuhnutí granulátu GT13	49
Obrázek 24. Doba tuhnutí granulátu GU14	49
Obrázek 25. Doba tuhnutí granulátu GU15	50
Obrázek 26. Zrnitost granulátu GT	50
Obrázek 27. Zrnitost granulátu GU	51
Obrázek 28. Průběh zkoušky statické zat. desky měřicího místa 1	57
Obrázek 29. Schéma montážního místa s vyznačenými body měření	58
Obrázek 30. Řez konstrukční vrstvou montážního místa	60

9 Seznam tabulek

Tabulka 1. Závislost zemí na energetickém uhlí [2]	3
Tabulka 2. Rozdíl v chemickém složení popílku [9]	10
Tabulka 3. Limitní hodnoty výluhu [23]	24
Tabulka 4. Základní průkazní zkoušky pro těleso násypu [23]	25
Tabulka 5. Doplnující průkazní zkoušky pro aktivní zónu a další využití [23]	26
Tabulka 6. Hodnoty Poissonova čísla [32]	36
Tabulka 7. Teploty zmrazování a počty cyklů zmrazování [33]	37
Tabulka 8. Fyzikálně mechanické vlastnosti granulátů	44
Tabulka 9. Optimální míra zhutnění a vlhkosti PS	47
Tabulka 10. Pevnost v tlaku GT12 po 28 dnech zrání ve vlhkém prostředí	51
Tabulka 11. Odolnost proti mrazu GT12 – 5 cyklů	51
Tabulka 12. Pevnost v tlaku GT13 po 28 dnech zrání ve vlhkém prostředí	52
Tabulka 13. Odolnost proti mrazu GT13 – 5 cyklů	52
Tabulka 14. Pevnost v tlaku GU14 po 28 dnech zrání ve vlhkém prostředí	52
Tabulka 15. Odolnost proti mrazu GU14 – 5 cyklů	53
Tabulka 16. Pevnost v tlaku GU15 po 28 dnech zrání ve vlhkém prostředí	53
Tabulka 17. Odolnost proti mrazu GU15 – 5 cyklů	53
Tabulka 18. Vyluhovatelnost granulátů	54
Tabulka 19. Výsledky měření statickou zatěžovací deskou	55